

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0373-04

高功率 KrF 激光性能改进及其应用

单玉生, 向益淮, 马景龙, 汤秀章, 龚堃, 李业军, 张骥, 马维义, 王乃彦

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要 采用无阶梯诱导空间非相干技术,对6束角多路高功率 KrF 激光中一束激光束进行光束平滑,用前端振荡器双程放大自发辐射(ASE)作为部分相干源,此部分相干光经过4f像传递,经电子束抽运预、主放大器放大,聚焦在靶上,靶上能量30 J/40 ns,靶斑300 μm ,分布不均匀性 $\sigma \leq 1.4\%$ 。此外,通常23 ns 前端单束类高斯型脉冲经主振荡功率放大(MOPA)后脉宽展宽为50 ns,采用增益饱和和开关技术,压缩脉宽经主放后得到30 J/25 ns 脉冲。用此单束30 J/25 ns 平滑光束辐照飞片,焦斑直径 $\sim 300 \mu\text{m}$,采用双层飞片(50 μm Kapton 膜+13 μm Al),单晶石英靶片,飞片飞行距离(空腔距) $\sim 160 \mu\text{m}$,用条纹相机对飞片撞靶速度进行了测量,得到飞片速度 $\sim 8 \text{ km/s}$,与1-D HYADES 流体动力学模拟相符。计算了靶中击波压力可大于1 Mbar(100 GPa)。用建立的钛宝石, KrF 混合型台面紫外高强度超短脉冲(440 fs)激光系统,靶面聚焦强度达到 10^{17} W/cm^2 。用此装置进行束靶作用超热电子研究,研制了180°电子磁谱仪,用其直接测量超热电子谱,得到超热电子温度 $\sim 81 \text{ keV}$ 。并用此超短脉冲注入电子束抽运 KrF 预放大器与主放大器得到8 J,皮秒级超短脉冲。并研究了能量信噪比随主放输入增大而下降的规律。

关键词 激光技术; 高功率 KrF 激光; 光束平滑; 增益饱和和开关; 激光加速飞片; 超短脉冲放大

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

Performance Provement of the High Power KrF Laser and Its Application

SHAN Yu-sheng, XIANG Yi-huai, MA Jing-long, TANG Xiu-zhang,
GONG Kun, LI Ye-jun, ZHANG Ji, MA Wei-yi, WANG Nai-yan

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract A beam smoothing experiment of one beam of the 6-beams high power KrF laser system at CIAE has been demonstrated using the technique of echelon-free induced spatial incoherence (EF-ISI). The focal profiles with 1.4% rms deviation from a flat top distribution through the laser system capable of producing 30-40 J per pulse in 50 ns at a target were obtained and the 50 ns pulse has been compressed to 25 ns by keeping the same energy per pulse using an optical gain-saturation switch method. The flyer acceleration experiments by a high-power smoothing beam KrF laser with a long pulse duration have been made. The flyer consists of Kapton film and Al foil, it is accelerated to the velocity of over 8 km/s by a power density of $7 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$ driving flyer with a focal spot diameter of 300 μm using KrF laser irradiation. The 1-D hydrodynamics simulation shows that the peak pressure caused by the impact of flyer is over 1Mbar in the impacted Cu target. In addition to above experiments the supershort laser amplification through electron pumped preamplifier and main-amplifier and the measurements of super-hot electron temperature for the supershort laser beam interactron with target by a 1800 electron magneto-spectrometer have been conducted.

Key words laser techniques; high power KrF laser; laser beam smoothing; gain saturation switch; flyer acceleration by laser; supershort laser pulse amplification

1 引言

在惯性约束核聚变(ICF)与惯性聚变能(IFE)研究领域及天体物理、地球物理领域某些研究中,要求短波长、宽频带、高效率、非线性效应小、可重复频率运行的新型高功率激光驱动器。为此我们设计、研制、建造了6束角多路传输120 J/23 ns 高功率 KrF 准分子激光主振荡功率放大(MOPA)系统“天光-I”^[1]。而

且,因为许多应用,如物质在高温高压下状态方程(EOS)测量、惯性约束聚变内爆物理研究与中心点火,均要求高功率激光束聚焦后空间分布要均匀、平滑,因此研制了各种光束平滑技术,其中当以美国海军实验室首先提出并研制的无阶梯镜诱导空间非相干(EF-ISI)光束平滑技术效果最佳,其运用于高功率 KrF 激光装置(Nike)上,单束在靶上焦点分布平

基金项目: 国家 863 高技术惯性约束聚变主题与国家自然科学基金(10299046)资助课题。

作者简介: 单玉生(1939-)男,中国原子能科学研究院研究员,博士生导师,主要从事高功率准分子激光及其与物质相互作用研究。E-mail: shanyys@iris.ciae.ac.cn

滑,非均匀性 $\sigma_{ms} \sim 1\%$,37束在靶上叠加,均匀性可达0.3%,并用此装置产生的平滑光束进行了内爆动力学有关瑞利-泰勒不稳定性研究^[2],并对液氙在数百万大气压下的状态方程进行了测量^[3]。此外,许多应用研究要求 KrF 激光脉冲宽度在一定范围内能够变化,提出了各种脉冲整形技术,其中日本电子综合研究所使用的饱和增益开关压缩脉冲方法^[4]比较简单、方便、高效、可靠。

最近,日本研究工作者利用菲涅耳相位波带板平滑的长脉冲(10~15 ns)高功率 KrF 激光进行了飞片实验,初步证明用长脉冲(15 ns)短波长 KrF 激光辐照多层飞片,在不太高能量下(≤ 100 J/脉冲)可以得到较高飞行速度(≥ 13 km/s),并初步证明了,飞片在飞行期间仍保持凝聚态。击靶后冲击波压力可达~10 Mbar^[5]。

为开展高温、高压下物质状态方程研究,对“天光-I”KrF 激光系统的性能进行改进。采用 EF-ISI 技术,对6束角多路高功率 KrF 激光中一束激光束进行光束平滑,采用饱和增益开关对单束脉宽进行压缩。用此单束平滑光束辐照双层飞片,测量飞片速度。

2 高功率 KrF 激光性能的改进

2.1 光束平滑

为开展 EOS 研究,根据各种平滑技术的比较与实际条件,在天光-I 采用无阶梯镜诱导空间非相干技术平滑光束,在角多路 MOPA 系统前端用一空间与时间上均为部分相干源均匀辐照一个小孔,然后这的孔之物像经过放大器放大成像在靶上,放大器置于或靠近小孔的傅里叶变换平面上,这种安排可使放大器的增益不均匀性对于靶上成像分布影响不大。此外,为了使靶上成像尽量反映该物孔的像,系统光学元件的累积像差所引起的角发散应该小于部分相干光的角发散。此外,一些非线性相位移即 B 积分要足够小,KrF 是气体介质,其饱和强度不大($\sim 1\sim 3$ MW/cm²)并且因天光-I 能量、功率不很大,因此 B 积分很小。

决定部分相干光空间、时间非相干性能的主要参量分别是部分相干源经小孔(小孔直径 $d=7.5$ mm)后束散角 θ 与光谱带宽 $\Delta\lambda$ 。经测量,束散角 $\theta=4.6$ mrad,带宽 $\Delta\lambda=0.4$ nm。此束散角 θ 是振荡器输出径所决定的衍射极限束散角 θ_D 的 50 倍,即衍射极限倍数 $\beta=50$,相应的相干域尺寸 $\delta, d/\beta, \delta=0.15$ mm,相当于产生 $\beta^2 \approx (d/\delta)^2=2500$ 个空间非相干小子束,

这些小子束经过像传递、放大、扩束在靶上叠加、成像,而子束间干涉形成的小斑点(Speckles)根据 EF-ISI 束平滑理论: $\sigma_{ms}=(\tau_c/t_w)^{1/2}$,在一定的、够大平均时间 t_w 内平均后,束的非均匀性(均方误差) σ_{ms} 由部分相干光束的相干时间 τ_c 决定。实验中 $\Delta\lambda=0.4$ nm,相应地 τ_c 为 0.5 ps,在脉冲宽度(~ 25 ns)内平均,则 $\sigma_{ms} \leq 1\%$ 。

图 1 是“天光-I”单束采用 EF-ISI 的装置示意图,前端利用 LPX 振荡器去掉原输出镜,只用反射镜,放电时得双程放大自发辐射(ASE)源,此 ASE 源是空间与时间部分相干源,用此源中间均匀部分辐照一个直径为 7.5 mm 的小孔,透过小孔的能量用 LPX 另一个放电型放大器放大,小孔的傅里叶变换面,位于 KrF 放电型放大器中心,经此放电型 KrF 放大器放大后,其输出经扩束及二级像传递到预放,预放输出至主放亦经扩束与二级像传递传输聚焦至靶上。

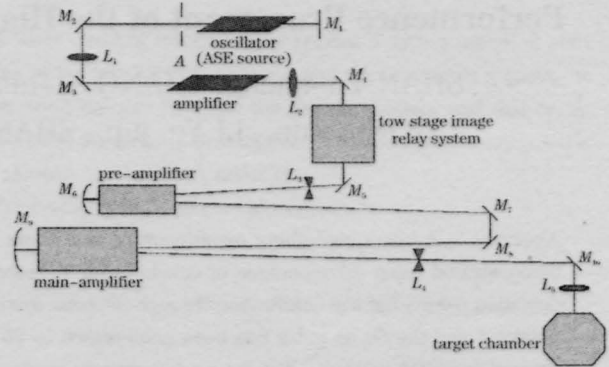


图 1 EF-ISI 光束平滑光路示意图

Fig.1 A schematic of the echelon-free induced spatial incoherence (EF-ISI) for beam-smoothing

“天光-I”用两级电子束抽运放大器进行能量(功率)放大,并且电子束抽运预放与主放均要置于像传递的傅里叶面上(或附近),经主放后至靶得到 30 J/50 ns 能量(功率),聚焦靶斑 300 mm,靶斑成像分布具有大平顶并且很平滑。图 2 是经预、主放

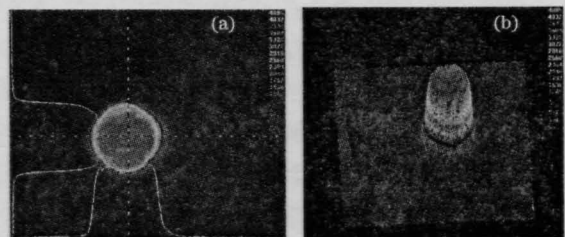


图 2 经预主放放大后聚焦靶斑分布

Fig.2 Focal profile through amplification of the main amplifier

放大并传至靶上的时间积分焦点分布,是经衰减后用 CCD 紫外相机测量的结果,其空间分布不均匀性 $\sigma_{rms} \sim 1.4\%$ 。

2.2 饱和增益开关法压缩脉冲宽度

ICF 或 EOS 基础研究要求脉冲宽度不要过宽。前述单束平滑后,由于主放饱和和放大,把前端 23 ns (FWHM)类高斯脉冲尾部抬高,使脉冲宽度由 23 ns 展宽到~50 ns。为压缩脉宽,采用饱和和增益开关方法:前端 23 ns 脉冲双程放大 ASE 源经小孔后,进入放电抽运 KrF 放大器单程放大,得到的平滑束分为两束,其中一束经衰减成小幅值 $0.01I_s$ (I_s 为饱和强度值)另一束保持较大幅值 $\sim I_s$,二者之间延时可调。大信号($\sim I_s$)进入电子束抽运预放大器,使放大器饱和,小信号($\sim 0.01I_s$)进入此放大器后,得到很高增益,适当调节二者延时,脉冲可被压缩并放大。实验用电子束预放大器(双程放大)作为增益饱和和开关,经预放大器输出脉宽压缩到 11ns,又经主放大器放大输出得到 30J/25ns KrF 激光脉冲,输出波形如图 3,用此单束 25ns 平滑光束进行有关高温、高压下物质 EOS 初步研究。

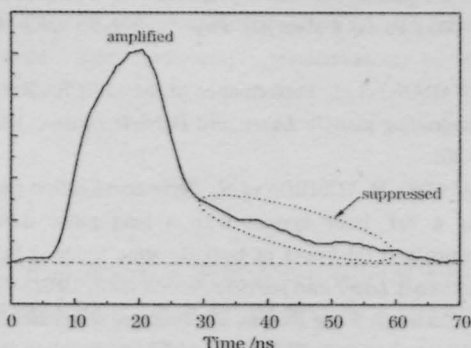


图 3 饱和增益开关压缩后的脉冲波形

Fig.3 Temporal shape pulse after compression by the gain-saturation switch

3 用长脉冲 KrF 激光驱动、加速飞片

为测量高温、高压下物质的状态方程,一般采用高功率脉冲激光直接辐照靶或者用激光辐照飞片,飞片加速再击靶,在靶中产生冲击波,靶物质(样品)受到冲击波产生的高压压缩,温度上升,使物质处于高温、高压状态,若同时测到击波速度和粒子速度,就可得到雨贡纽曲线上一个点。就一般情况而言,直接辐照靶要得到 1 TPa 高压(10 Mbar)或更高,要求靶上聚焦功率密度 $\geq 10^{14}$ W/cm², 焦斑直径为 300 μ m,脉冲宽度达到 1 ns 级,则需要千焦耳级高能激光系统。而且为精确测量物质 EOS,要求激光辐照靶产生大尺寸焦斑,产生空间分布均匀、随时间稳定,X 射

线和电子预热小的干净冲击波,KrF 激光可能满足这些要求。最近文献[5]证明,采用短波长、宽脉冲、平滑 KrF 激光束辐照飞片,可得到“快”和“冷”的飞片,并证明用小于 100 J/15 ns KrF 激光,靶斑直径 300 μ m, 聚焦功率密度 10^{13} W/cm², 辐照 4 μ m Ta (其由 2 μ m Al+90 μ m Pt+4 μ m Ta 组成) 飞片,可得到 ≥ 13 km/s 速度,并保持凝聚态(这点仍需进一步证明)用此飞片击 Cu 靶,实验并配合模拟计算表明此飞片在靶中可产生大于 10 Mbar 压力。

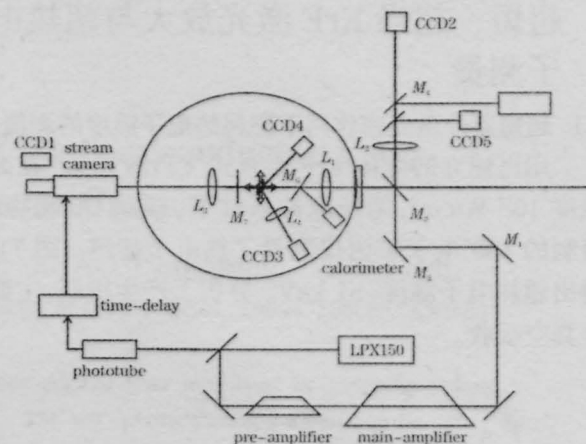


图 4 冲击波、飞片速度测量实验装置

Fig.4 A schematic of the experiment setup for the shock wave and the flyer velocity measurements

用单束 KrF 平滑激光束,焦点直径为 300 mm,功率密度为 7×10^{11} W/cm² 直接辐照(Kapton 膜+铝箔)靶,图 4 是实验装置,用条纹相机测不到靶背表

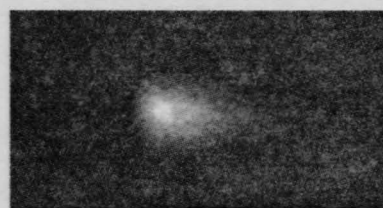


图 5 飞片-靶结构示意图与飞片击靶冲击波

Fig.5 Streak camera record of the flyer impact with target

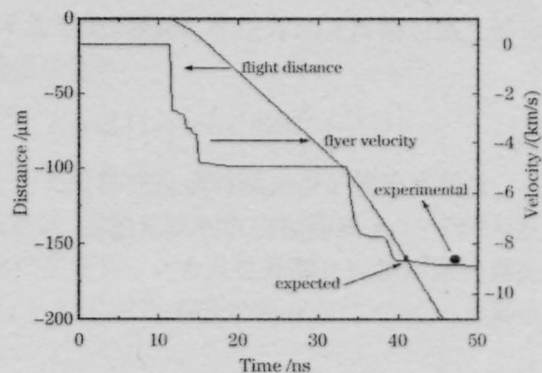


图 6 1-D 流体动力学模拟计算

Fig.6 Result of 1-D hydrodynamic simulation

面在冲击波作用下的光辐射,说明激光强度太小。但在同样条件下,辐照飞片(50 μm Kapton+13 μm Al),飞行距离 160 μm ,碰撞石英晶体平面靶,得到碰撞速度 8.7 km/s,与 1-D 流体动力学模拟计算相符,见图 5,图 6,出靶内击波压力达到 1.3 Mbar,击波较平滑。证明飞片阻滞法使靶内击波压力增强,用短波长 KrF、长脉冲时在较低功率密度下可得到大于 1Mbar 击波压力。

4 超短、超强 KrF 激光放大与超热电子测量

4.1 超短紫外激光束作用下靶超热电子温度的测量

用已建立的固体/KrF 混合式飞秒激光器^[6]在高强度 10^{17} W/cm²,无预脉冲条件下,辐照 Cu 靶;用研制的 180°电子磁谱仪测量了热电子能谱(图 7),得出超热电子温度~81 keV。分析了产生机制,主要是真空吸收。

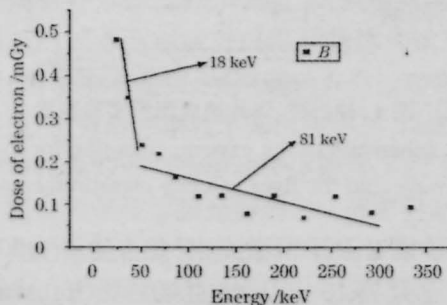


图 7 180°电子磁谱仪测量超热电子谱

Fig.7 Hot electron energy spectra measured by 180° electron magneto-spectrometer

4.2 超短脉冲放大研究

为开展有关快点火基础物理研究,建立超短脉冲高亮度源,用上述台面紫外超短激光,经 50 mJ/440 fs 激光电子束抽运预放与主放大后得到 8 J/ps 级输

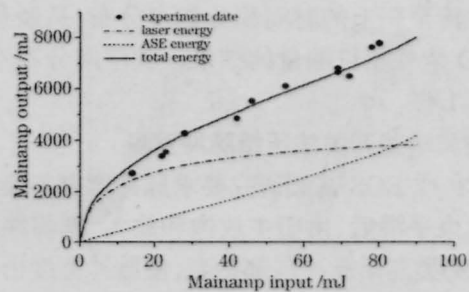


图 8 超短脉冲放大曲线与实验比较

Fig.8 Curves of the supershort pulse amplification for comparison of the measured data with a simulation

出,研究了脉冲输出能量与注入能量关系,并据 1-D 超短放大模型数值计算了 ASE 的影响,见图 8。

参 考 文 献

- 1 Shan Yusheng, Wang Naiyan *et al.*. A six-beam high-power KrF excimer laser system with energy of 100 J/23 ns[J]. *Laser and Particle Beams*, 2002, **20**: 123-127
- 2 S. P. Oberschain, S. E. Bodner *et al.*. the Nike KrF laser facility: performance and initial target experiments[J]. *Phys. Plasmas*, 1966, **3**(5): 2098-2107
- 3 A. N. Mostovych, Y. Chan *et al.*. Reflected shock experiments on the equation-of-state properties of liquid deuterium at 100-600 GPa (1-6 Mbar)[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**: 3870-3873
- 4 Y. OWADANO *et al.*. Performance of the ASHURA KrF laser and its upgrading plan[J]. *Laser and Particle Beams*, 1993, **11**(2): 347-351
- 5 T. KADONO, M. YOSHIDA *et al.*. Flyer acceleration experiments using a KrF laser system with a long pulse duration and pressure and thickness of isobaric zone induced in impacted materials[J]. *Laser and particle Beams*, 2001, **19**:623-630
- 6 Shan Yusheng, Wang Naiyan, Ma Jinglong *et al.*. Researches on high power excimer KrF laser and its interaction with target [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):193-196
单玉生,王乃彦,马景龙等. 高功率 KrF 准分子激光及其束靶相互作用研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(增刊):193-196