

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0193-04

高功率 KrF 准分子激光及其束靶相互作用研究

单玉生 王乃彦 马景龙 陶业争 汤秀章 马维义 王孝军 龚堃 杨大为
姜兴东 冯奇 高怀林

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

提要 建立了一套 6 束百焦耳 23 ns 角多路 KrF 准分子激光 MOPA 系统, 靶上能量达到 120 J, 靶上功率密度可以达到 10^{13} W/cm²。目前正在进行离子飞行时间测量、等离子体温度测量等靶物理研究。还建立了一套 Ti:sapphire/KrF 固体/气体混合式紫外超短脉冲激光系统, 该系统输出 50 mJ/220 fs/248 nm/10 Hz 的激光脉冲, 靶上功率密度超过 10^{17} W/cm², 研究了辐照固体靶产生的超热电子能谱。

关键词 KrF 激光, 束靶作用, 超热电子能谱

中图分类号 TN248.2⁺1; O437 **文献标识码** A

Researches on High Power Excimer KrF Laser and Its Interaction with Target

SHAN Yu-sheng WANG Nai-yan MA Jing-long TAO Ye-zheng TANG Xiu-zhang
MA Wei-yi WANG Xiao-jun GONG Kun YANG Da-wei JANG Xing-dong
FENG Qi GAO Huailin

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract A six-beam multiplexing master-oscillator-power-amplifier (MOPA) high power KrF excimer laser system has been built, the energy on the target has reached 120 J, and the focal intensity on the target can be up to 10^{13} W/cm². The researches for ion flight time measurement, plasmas temperature measurement and other plasma physics study are being carried out. A Ti:sapphire/KrF hybrid UV ultrashort pulse laser has been also built, it can produce 50 mJ/220 fs/248 nm laser pulse, the intensity on the target exceeds 10^{17} W/cm². The hot electron spectrum from the solid target has been studied.

Key words KrF excimer laser, laser-target interaction, hot electron spectrum

1 引 言

由于具有短波长(248 nm)、宽频带(3 THz)、高效率、可重复频率运行、高能量/价格比等优点, KrF 准分子激光是 ICF 和惯性聚变能源(IFT)研究中最有希望的驱动器之一。由于宽频带激光的空间相干长度短($\tau = \Delta v^{-1}$), 因而通过采用 ISI 等光滑技术可以实现对靶的均匀辐照, 从而避免了靶面热点诱发的各种参量不稳定性, 如受激布里渊散射, 受激拉曼散射, 以及光束在靶面等离子体中有自聚焦等现象。并且能大为减少流体动力学中“印痕”与瑞利-泰勒(R-T)不稳定性。为此, 各国在发展固体激光驱动器的同时, 积极开展气体 KrF 准分子激光研制。美国海军实验室建起了 5 kJ/4 ns 的 NIKE KrF 激光装置; 英国卢瑟福实验室建起了 2 kJ/50 ns 的

Titania KrF 装置; 日本电子综合技术研究所及电讯大学分别建起 660 J/15 ns 的 ASHURA KrF 激光装置与另一台 780 J/ns 的 KrF 激光装置。海军实验室(NRL)的 NIKE 装置单束辐照不均匀性为 1%, 37 束迭加后的不均匀性为 0.3%, 是目前所有 ICF 激光器中最均匀的, 并且已经进行了令人鼓舞的实验。

KrF 准分子激光介质(混合气体)是一种理想的超短脉冲激光放大介质, 和固体介质比较, 气体介质具有非线性效应小的优点。另外 KrF 激光具有较低的饱和能量密度(mJ/cm²), 可以采用小压缩/展宽倍数的 CPA(啁啾脉冲放大)技术, 可以得到高光束质量的激光束。但同时又因为低饱和能量密度, 要想得到高能量, 必须采用大口径 KrF 放大器。

表 1 各国用于 ICF 实验研究的 KrF 激光装置技术指标

Table 1 The specifications of KrF laser used to ICF in the world

country	name	name of Lab.	energy	beam No	wavelength(μm)	condition
USA	Nike	Navy Lab.	3 kJ/4 ns	56	0.249	MOPA
UK	Sprite	Rutherford Lab.	150 J/60 ns		0.249	Oscillator
	Titania	Rutherford Lab.	1.7 kJ/140 ns		0.249	Oscillator
Japan	Ashura	ETL	710 J/100 ns		0.249	Oscillator
	Ashura	ETL	660 J/15 ns	6	0.249	MOPA
	Super Ashura	ETL	2 kJ/20 ns	12	0.249	MOPA
Russia	GARPUN	Lebejef	100 J/100 ns		0.249	Oscillator
Canada	X	Albert Univ.	30 J/60 ns		0.249	Oscillator
China	HEAVEN- I	CIAE	407 J/200 ns		0.249	Oscillator
	HEACEN- I	CIAE	110 J/23 ns	6	0.249	MOPA

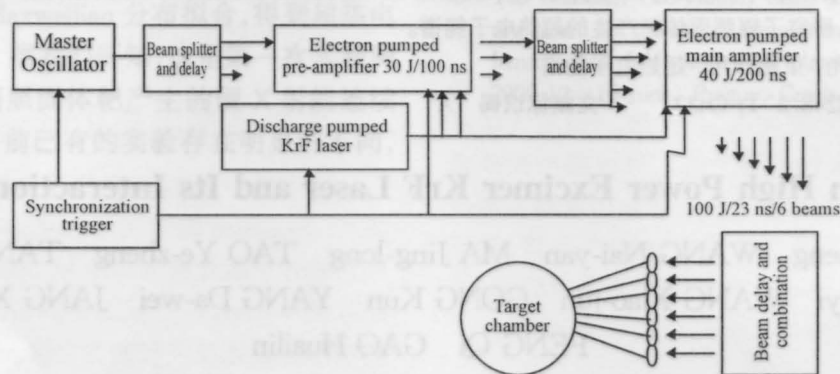


图 1 6 束百焦耳 23 ns KrF MOPA 系统结构示意图

Fig. 1 The structure scheme of 6 beam 100 J/23 ns KrF MOPA system

2 6 束百焦耳 23 ns KrF 准分子激光系统

6 束百焦耳 23 ns KrF 准分子激光系统采用主振荡器和功率放大器(MOPA)结构,图 2 是 6 束百焦耳 23ns KrF MOPA 系统结构示意图。系统包括一个配有真空空间滤波器的主振荡器、两级电子束双向抽运 KrF 准分子激光放大器[预放大器($\varphi 120$ mm, 40 J/100 ns)和主放大器($\varphi 260$ mm, 400 J/200 ns)]、光学角多路传输系统、激光开关、同步和高压触发系统、自动控制和数据获取系统、电子束和激光束诊断系统以及真空靶室等系统。

前端(LPX-150)输出激光脉冲经空间滤波器后,被光学角多路编码系统倍分为 4 束,其中 3 束经输入阵列透镜扩束,以不同角度、在时间上顺序经过预放大器激光增益区并充满整个口径($\varphi 120$ mm),经凹面全反射镜反射再次经过激光增益区到达输出阵列透镜($\varphi 30$ mm, 3 个),激光束经历双程放大。双程放大后的 3 束激光被预放输出透镜阵列准直,再进行角多路编码成为 6 束,经过主放输入阵列透镜($\varphi 30$ mm, 6 个)扩束以不同角度和在时间上依次

通过主放大器增益区,被凹面全反射镜反射再次通过主放增益区,经历双程放大后的 6 束激光经过输出阵列透镜($\varphi 90$ mm, 6 个),此时 6 束激光在空间和时间上仍然是分离的 6 个激光脉冲。从主放大器输出的 6 束激光传输到光学角多路解码系统,经过消延时 6 束激光同时到达组合聚焦系统的球面反射镜阵列($\varphi 135$ mm, 6 个),反射缩束后的激光束被放置在真空靶室窗口处的聚焦透镜阵列($\varphi 40$ mm, 6 个)聚焦至靶上。

预放大器和主放大器均采用双向电子束抽运方式使得放大器增益区更均匀。预放大器 Marx 发生器采用 14 级电容充电,充电电压约 980 kV;脉冲形成线阻抗为 7Ω ;在每个脉冲成形线上使用激光触发开关,采用了径向绝缘结构的二极管真空,间距 1.8 cm,传输线和二极管阻抗为 7Ω ,阴极面积为 $10 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,二极管电流为 57 kA。预放大器激光腔口径为 $\varphi 120$ mm、单程增益长度为 40 cm。在 Marx 充电电压 $V_{\text{Marx}} = 60 \text{ kV}$ 、二极管电压和电流分别为 $V_d = 450 \text{ kV}$ 和 $I_d = 60 \text{ kA}$ 、激光介质气体为 Ar:Kr: $F_2 = 89.6\% : 10\% : 0.4\%$ 混合气体总气压为 2 atm 条件下,输出激光能量为 42 J。主放大器由 Marx

发生器、水介质单线型同轴脉冲形成线、激光触发主开关、分路脉冲传输系统、四个分离大面积二极管和带有四个 $20\text{ cm} \times 48\text{ cm}$ 电子束窗口的激光腔组成。主放大器 PFL 采用多电极激光触发开关, 二极管阻抗 $Z = 10\ \Omega$, 膜的支撑结构 (Hibachi) 筋宽为 0.2 cm , 深 0.5 cm , 几何透过率为 89% 。主放大器激光腔口径为 260 mm 、单程增益长度为 900 mm , 在 Marx 充电电压 $V_{\text{Marx}} = 65\text{ kV}$ 、二极管电压和电流分别为 $V_d = 600\text{ kV}$ 和 $I_d = 60\text{ kA}$ 、激光介质气体为 $\text{Ar}:\text{Kr}:\text{F}_2 = 89.6\%:10\%:0.4\%$ 混合气体总气压为 2 atm 条件下, 主放大器平行平面腔和非稳腔输出激光能量均大于 400 J 。要实现 6 束激光的高效率放大, 最后在靶上得到高功率, 整个 MOPA 系统必须准确地同步, 包括电子脉冲加速器驱动的两台大口径电子束抽运激光放大器、三台激光触发气体开关、两台放电抽运准分子激光器。包括同步关联逻辑和高压脉冲信号触发器以启动两台加速器和两台激光器, 使 MOPA 系统各关键单元同步运转, 系统总抖动时间不大于 11 ns 。电子束装置非常稳定, 可以非常好地重复工作, 电子束稳定性小于 $\pm 5\%$ 。

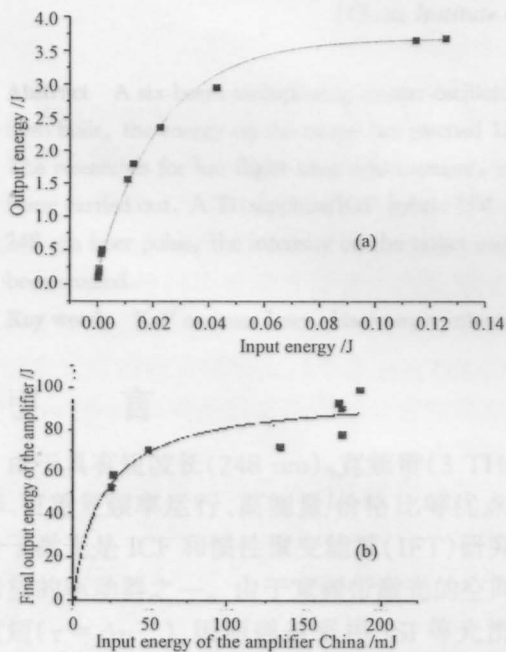


图2 预放大器(a)和主放大器(b)输入、输出曲线
Fig.2 The input/output curve of pre-amplifier (a) and main amplifier (b)

为了研究预放大器的放大特性, 测量了预放大器和主放大器输入/输出曲线, 如图 2 所示, 放大器条件和上面一致。

实验发现注入激光束空间分布在放大过程中得

到了改善, 放大后的激光束变得更均匀了, 原因是放大器的饱和效应。单束时在上述聚焦系统参数下, 靶点直径为 $\sim 270\ \mu\text{m}$; 6 束调焦后焦斑直径为 $\sim 290\ \mu\text{m}$; 为保证 CCD 不饱和 LPX 输出 $400\text{ mJ}/23\text{ ns}$ 要衰减 10^9 倍后才能测到焦斑空间分布。全系统注入放大, 在靶处经消延时、聚焦后 6 束能量可达 $109\text{ J}/23\text{ ns}$, 用 LPX 经此整个系统后, 用 CCD 测到的靶上功率密度可达 $8 \times 10^{12}\text{ W}/\text{cm}^2$ 。

KrF 准分子激光因为具有短波长、宽频带的特点, 使得它与物质相互作用研究具有独有的特点。目前正在开展光束均匀化研究, 使得远场均匀性好于 10% 。在均匀性可靠的前提下, 进行基础的等离子体诊断和状态方程研究。

3 紫外高强度超短脉冲激光系统

装置是一套固体/气体混合式飞秒激光器, 由一套 Ti:Sapphire 固体飞秒激光器和一级放电抽运谱 KrF 准分子激光放大器组成。Ti:Sapphire 飞秒激光器输出 $744\text{ nm}/120\text{ fs}/12\text{ mJ}/10\text{ Hz}$ 的激光脉冲, 经三倍频器后激光波长转换为 248 nm , 注入到放大器中进行放大, 最后输出 $248\text{ nm}/440\text{ fs}/50\text{ mJ}/10\text{ Hz}$ 的激光脉冲, 远场焦斑为 1.6 倍衍射极限。激光束由一个焦距为 40 cm 的平凸球面透镜聚焦到靶表面上, 焦斑由一个放大倍数为 40 倍的组合物镜 (德国莱斯公司) 成像到紫外 CCD 上进行测量, 焦斑半宽度为 $5\ \mu\text{m}$, 则靶上强度可以达到 $10^{17}\text{ W}/\text{cm}^2$ 。在没有注入的情况下, 放电抽运 KrF 准分子放大器的 ASE 在靶上的能量为 3 mJ 、焦斑直径为 2 mm 、脉冲宽度为 30 ns , 则强度小于 $10^7\text{ W}/\text{cm}^2$, 明显低于在固体表面形成等离子体的阈值, 则 ASE 对激光等离子体的相互作用没有影响。如此低的 ASE 水平来源于 KrF 放大器采用的离轴放大技术^[10]。

目前, 我们正在进行利用大口径电子束抽运 KrF 准分子激光器方面的研究工作, 目的是建立靶上聚焦强度超过 $10^{19}\text{ W}/\text{cm}^2$ 的短波长激光器。方案是把已有的 $50\text{ mJ}/440\text{ fs}$ 的超短脉冲激光束, 注入到 6 束百焦耳 KrF 激光系统的放大链中进行放大, 得到焦耳量级的超短脉冲激光。放大中采取相应的光束质量控制措施, 保持种子源良好的可聚焦性, 最后在靶上得到较小的焦斑和高的聚焦强度。可能的能量提取方案包括 CPA 技术和 Raman 组束技术。已经进行了验证放大器对超短激光脉冲的放大能力的实验, 把能量为 $30\text{ mJ}/440\text{ fs}$ 的激光束注

入到主放大器中,得到了能量为 3 J 的激光脉冲。下一步的工作是,研究超短脉冲激光放大过程中的关键技术问题,例如,非线性效应、窗口和激光介质的优化、激光光束质量控制、相干组束技术以及相关测量技术。

4 强场物理研究

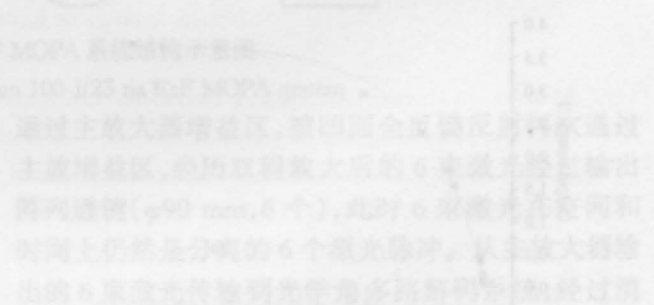
利用低本底计数的单光子入射方法测量了紫外超短脉冲激光在固体靶上产生的硬 X 射线能谱。在高强度(10^{17} W/cm²)、无预脉冲条件下,探测到了能量大于 200 keV 的 X 射线信号,能谱可以用具有三个特征温度的 Maxwellian 分布拟合,得到超热电子温度为 67 keV。据我们所知,这是第一次实验测量紫外飞秒激光辐照固体靶产生的硬 X 射线连续谱。实验结果和目前已有的实验存在明显的不同,

需要细致的理论解释和数值模拟。本工作对于理解超热电子产生机制和理解紫外激光在“快点火”研究中应用的可能性是有意义的。

参 考 文 献

- 1 Wang Naiyan, Shan Yusheng, Tao Yezheng *et al.*. Activities of developing high-power KrF lasers and studying laser plasmas interaction physics at CIAE. *Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), (Submitted) (in Chinese)
- 2 Shan Yusheng, Wang Naiyan, Ma Weiyi *et al.*. Recent Progress of "Heaven One" High Power KrF Excimer Laser Sysytem. CLEO/Pacific Rim'99, 302~303
- 3 Tao Yezheng, Gao Huilin, Shan Yusheng *et al.*. Hard X-ray and hot electron generation from high intensity femtosecond UV laser-solid plasmas interaction ECLIM 2000 12~16 June, Prague, Czech Republic

通过主放大器增益区,第四级全反射镜将光束通过主增益区,经反射镜放大后的 6 束激光经输出阵列透镜($\phi 90$ mm, 6 个),此时 6 束激光在时间和空间上仍然是分离的 6 个激光脉冲,从主放大器输出的 6 束激光经激光光学多路阵列透镜经过清洗时与喇曼散射光同时经全反射镜反射镜阵列($\phi 135$ mm, 6 个),反射镜后的激光束被放置在其次级窗口经全反射镜阵列($\phi 40$ mm, 6 个)聚焦至靶上。



两次大腔和主放大器均采用双腔结构,该种方式使激光增益区更均匀。该放大器中,发生器采用 14 节电容器,充电电压约 90 kV,脉冲宽度约 7 ns。在第二个增益区靶区上方用激光清洗开关,采用了控制磁体控制两靶区其他,靶区 1 上喇曼散射光经全反射镜阵列(靶区增益区为 0.5×0.4 mm²)阵列透镜阵列($\phi 90$ mm, 6 个)激光束经清洗透镜阵列($\phi 135$ mm, 6 个)阵列透镜阵列($\phi 40$ mm, 6 个)聚焦至靶上。

两次大腔和主放大器均采用双腔结构,该种方式使激光增益区更均匀。该放大器中,发生器采用 14 节电容器,充电电压约 90 kV,脉冲宽度约 7 ns。在第二个增益区靶区上方用激光清洗开关,采用了控制磁体控制两靶区其他,靶区 1 上喇曼散射光经全反射镜阵列(靶区增益区为 0.5×0.4 mm²)阵列透镜阵列($\phi 90$ mm, 6 个)激光束经清洗透镜阵列($\phi 135$ mm, 6 个)阵列透镜阵列($\phi 40$ mm, 6 个)聚焦至靶上。

靶区 1 上喇曼散射光经全反射镜阵列(靶区增益区为 0.5×0.4 mm²)阵列透镜阵列($\phi 90$ mm, 6 个)激光束经清洗透镜阵列($\phi 135$ mm, 6 个)阵列透镜阵列($\phi 40$ mm, 6 个)聚焦至靶上。