

文章编号: 1001-4322(2002)03-0381-04

类镍-银 X 射线激光及其应用实验研究*

王 琛¹, 顾 援¹, 王世绩¹, 黄关龙², 林尊琪², 张国平³

(1. 上海激光等离子体研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800;

3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 在神光 II 激光装置上进行了类镍-银 X 射线激光及其作为探针测量等离子体电子密度的实验研究, 获得了类镍-银 X 射线激光饱和输出, 并获得了包含待测等离子体电子密度分布信息的莫尔条纹图像。

关键词: 类镍-银 X 射线激光; 增益饱和; 等离子体电子密度诊断

中图分类号: O 53; TN 24

文献标识码: A

X 射线激光是指波长在 X 射线波段的激光, 兼具短波长和激光两方面的特点, 因此自首次演示成功以来^[1], 就以诱人的应用前景而引起了广泛的关注^[2~7], 并相继发展出了双靶对接、预-主脉冲打靶等实用新技术。X 射线激光应用研究的前提是获得高亮度、高光束质量、能够实用的 X 射线激光输出; 而类镍-银 X 射线激光的波长 13.9nm, 非常接近于 Mo: Si 多层膜 X 射线光学元件的最大反射效率波长, 因此对 X 射线激光应用研究具有更大的优越性^[6,7]。另一方面, 利用 X 射线激光作为探针, 因其波长短, 可以探测到临界密度面附近等离子体的状态信息, 对诊断等离子体电子密度分布的实验研究具有明显的优势^[8,9]。这些实验数据不但能够给出在目前情况下的理论计算及数值模拟还较难做出准确描述的等离子体相关信息, 更能很好地校验数值模拟程序, 对惯性约束聚变(ICF)、X 射线激光等前沿学科领域的研究具有重大的意义。

本文中, 我们在神光 II 高功率激光装置上, 利用预-主脉冲和双靶对接技术进行了类镍-银 X 射线激光实验研究, 获得了增益饱和的 13.9nm X 射线激光输出。并利用此 X 激光输出作为探针, 采用莫尔偏折法, 诊断了激光打 CH 靶产生的等离子体的电子密度分布情况, 获得了初步的结果。

1 X 射线激光出光实验

实验在高功率激光物理国家实验室的神光 II 激光装置上进行, 南北两路预主脉冲激光驱动对接双靶, 产生 X 射线激光。驱动激光波长 1.053 μm , 脉冲宽度(FWHM)约 80ps 时, 每一路输出激光能量约 80J。预脉冲强度为主脉冲的 4%, 提前约 3ns。泵浦激光通过由五单元不等宽柱面透镜列阵和非球面主透镜组成的线聚焦系统, 在靶面形成尺寸 18mm \times 80 μm 的均匀线聚焦, 靶面辐照激光功率密度约 $6 \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$, 根据氦-氖光模拟实验的结果, 焦线长度方向上辐照强度的不均匀性 $< \pm 8\%$ 。采用准行波泵浦方式, 以保证双靶产生的两段等离子体增益区的维持时间良好匹配。靶采用在玻璃基板镀银的方法制备, 银膜的厚度大于 1 μm 。靶的长度为 16mm, 与驱动激光焦线的位置匹配, 保证靶的两端不产生冷等离子体。采用名义刻线密度为 1200/mm 的变栅距光栅平聚焦谱仪进行时间积分 X 射线激光光谱测量, 后接软 X 射线 CCD 记录。为防止 CCD 饱和, 谱仪中插入 C₈H₈ 滤片以衰减 X 射线激光强度。

除了进行双靶对接的实验, 还分别进行了不同长度的单靶出光实验, 并据此绘制了 X 射线激光输出能量随靶长变化的增益曲线, 如图 1 所示。由于光栅谱仪使用 C₈H₈ 滤片, 13.9nm 附近短波长 X 光二级谱产生的本底影响较大, 因此采用 X 射线激光的二级谱(对应于波长 27.8nm 的位置)数据绘制增益曲线。图中用星号表示实际测量的二级谱结果; 为了进行比较, 还用圆圈标出了根据一级谱 50% 折算后的数据。根据多发同时记录到一、二级谱的实验结果对比, 选取 50% 是合理的。图 1 可以看出, 在靶长 12mm 时, X 射线激光输出开始出现饱和, 小信号能量增益系数约为 14cm^{-1} 。在总长 32mm 的双靶对接实验时, 等效能量增益长度积达到 17, 表明 X

* 第六届全国激光科学技术青年学术交流会优秀论文。

收稿日期: 2001-11-21; 修订日期: 2002-02-22

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(69989801); 国家 863 激光技术领域资助课题(863-410-3-3)。

作者简介: 王 琛(1976-), 男, 在读博士, 主要从事 X 射线激光研究; E-mail: wchll@163.com。

射线激光输出进入了深度增益饱和。

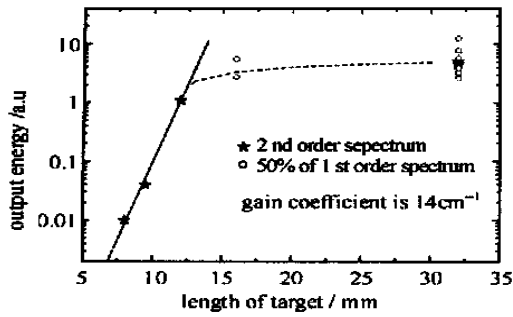


Fig. 1 Gain curve of X-ray laser drawn according to the 2nd order spectrum

图 1 X 射线激光增益曲线, 利用二级谱绘制

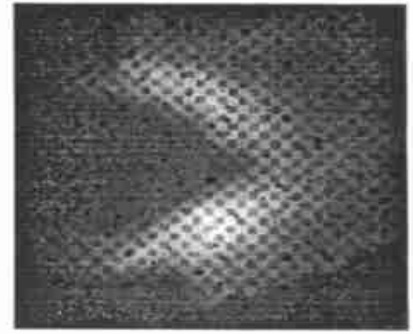


Fig. 2 Quasi-far-field pattern of X-ray laser

图 2 X 射线激光准远场场图

实验还对 X 射线激光的准远场场图进行了测量, 通过采用多层膜球面反射镜对距离 X 射线激光输出端 50mm 处放置的一块厚约 $4\mu\text{m}$ 的二维方格调制硅箔靶的 X 射线激光透过成像, 获得了清晰完整的 X 射线激光场图, 如图 2 所示。图中强度方格调制是由于调制硅箔靶对 X 射线激光不同的衰减产生的。场图中, X 射线激光光束分布沿靶面方向分为上下两部分, 在中间位置有明显的弱区。分析表明, 可能是辐射光电离的影响。类镍-银增益区的最佳电子密度约为 $5 \times 10^{19}/\text{cm}^{-3}$, 远低于 $1 \times 10^{21}/\text{cm}^{-3}$ 的临界密度, 等离子体的加热和电离主要是通过临界面附近等离子体的辐射热传导和电子热传导进行的。辐射热传导速度快得多, 如果强度较大, 则在电子温度很低时, 等离子体就可能过电离了。在等离子体中部, 辐射强度大, 容易因辐射过电离而使得增益减小; 而两侧边缘区域辐射强度低, 反而可能形成高增益区。X 射线激光在传播时向边缘折射, 就形成了输出 X 射线激光分成上下两支的现象。另一方面, 考虑到光路的衰减, 对整个场图积分, 可以估计出 X 射线激光的总输出能量约为 $250\mu\text{J}$ 。

2 X 射线激光应用实验研究

利用出光实验获得的类镍-银 13.9nm 饱和输出 X 射线激光作为探针, 采用偏折法, 进行了等离子体电子密度测量的实验研究。偏折法的实质是通过测量探针穿过等离子体后传播方向的改变而计算等离子体电子密度梯度分布的方法, 为此专门研制了能够精确测量光束偏折角度的莫尔偏折仪^[10]。莫尔偏折仪由两块口径 10mm 的 Ronchi 光栅构成, 通过光束穿过两块光栅后相成的莫尔条纹的移动来精确地测量光束在垂直光栅刻线方向上的偏折。光栅的刻线周期 $p = 28.6\mu\text{m}$, 刻线夹角和间距连续可调。

实验方案排布如图 3 所示。双靶对接产生 X 射线激光输出作为探针, 第三路驱动激光用非球面透镜聚焦成直径约 $500\mu\text{m}$ 的光斑打平面厚 CH 靶产生待测等离子体, 靶面辐照光强约为 $1 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 。调整驱动激光光程, 使得 X 射线激光在待测等离子体产生后约 1ns 穿过。使用曲率半径为 600mm 的球面 Mo/Si 多层膜成像镜和平面中继镜对待测等离子体进行成像, 放大 9.4 倍, 通过莫尔偏折仪后用 CCD 记录。实验中选择双光栅夹角 $\theta = 4.5^\circ$; 间距为单倍 Talbot 距离 $d = 58.7\text{mm}$, 由此可得, 莫尔条纹间距 $S = p/\theta = 360\mu\text{m}$, 空间分辨率为 $2.5\mu\text{m}$, 条纹移动一个周期对应光束偏转 4.6mrad 。为了防止杂散光入射到 CCD 上, 莫尔偏折仪是光密的, 并在进光口放置了衰减倍数约 150 倍的铍膜作为滤片。

实验获得了清晰的莫尔条纹图像, 如图 4 所示。图中左边是靶的阴影, 外围的圆是滤片框和光栅外框的阴影。图 4(a) 是没有受等离子体扰动的静态条纹, 条纹的对比度约 0.6, 间距约 $363\mu\text{m}$, 倾斜角度约 15° ; 均与理论结果相符。图 4(b) 是加入待测等离子体扰动后获得的动态莫尔条纹图像, 其中条纹的强度是等离子体自发辐射的 5 倍以上。图 4(b) 中下方左边阴影与条纹的交界面很清晰, 对应着初始靶面位置。

选择其中一个条纹进行数据处理, 按照靶面方向测量莫尔条纹的移动量^[10], 计算出了等离子体电子密度梯度的空间分布, 如图 5 中实心方块所示。图中(圆圈)还给出了假定电子热导限流因子 $f_{e\infty} = 0.1$ 时理论模拟的等离子体电子密度梯度的空间分布, 理论与实验结果符合得相当好。假定在离靶初始表面 $100\mu\text{m}$ 处的等离子体电子密度为 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 或 $7 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ (理论模拟值), 可以进一步计算出电子密度的空间分布, 结果如图 6 所示。尽管在离靶面较远处算出的电子密度差别很大, 但在离靶面较近处 ($30\mu\text{m}$), 计算的结果十分接近, 都趋于 $2 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 。这个数值, 已经超过了等离子体的临界密度 ($1 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$)。

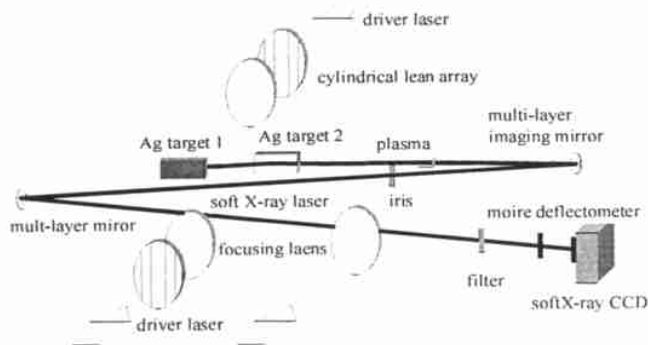
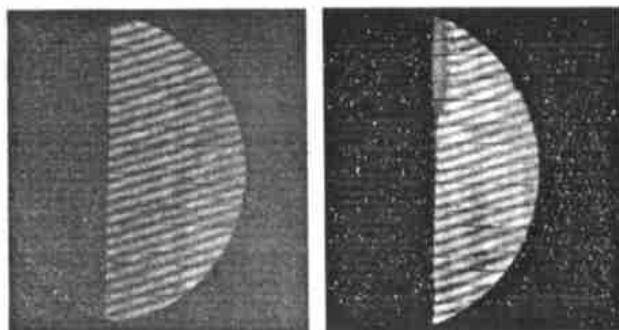


Fig 3 Experimental setup of diagnosing plasma by moiré deflection method

图 3 莫尔偏折方法测量等离子体电子密度实验布局



(a) static deflectogram (b) dynamic deflectogram

Fig 4 Recorded moiré deflectogram s

图 4 莫尔条纹图像

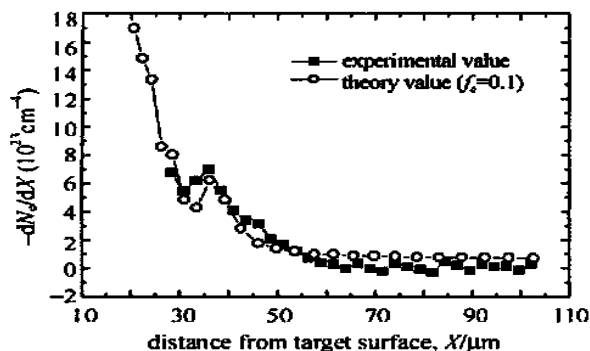


Fig 5 Electron density gradient distribution

图 5 电子密度梯度分布

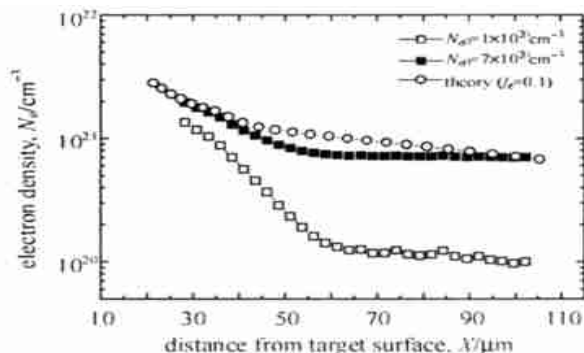


Fig 6 Electron density distribution calculated from Fig 5

图 6 电子密度分布, 根据图 5 计算所得

3 结 论

获得了饱和输出的类镍-银 13.9nm X 射线激光, 小信号增益系数 14cm^{-1} , 根据场图估算 X 射线激光输出能量约 $250\mu\text{J}$ 。利用获得的饱和 X 射线激光作为探针, 采用偏折法对激光打 CH 靶产生的等离子体进行了电子密度诊断, 获得了包含等离子体电子密度信息的动态莫尔条纹图像, 获得了高密度等离子体电子密度分布的一些相关信息。

致谢 衷心感谢神光 II 运行组全体人员, 他们保证了高水平的器件运行; 感谢同济大学陈玲燕小组提供了实验用靶和衰减滤片; 感谢长春光机所曹健林小组和上海光机所邵建达小组为实验提供了多层膜反射镜。

参考文献:

[1] Matthews D L, Hagelstein P L, Rosen M D, et al Demonstration of a soft X-ray amplifier[J]. *Phys Rev Lett* 1985, **54**: 110

[2] Wang S J, Gu Y, Zhou G L, et al Experiment research on saturated-gain for soft X-ray laser from neon-like germanium plasma[J]. *Chin Phys Lett*, 1991, **8**: 618

[3] DaSilva L B, MacGowan B J, Rowka S Power measurements of a saturated yttrium X-ray laser[J]. *Opt Lett* 1993, **18**: 1174

[4] Rocca J J, Clark D P, Chilla J L A. Energy extraction and achievement of the saturation limit in a discharge-pumped table-top soft X-ray amplifier[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, **77**: 1476

[5] Zhang J, MacPhee A G, Lin J, et al A saturated X-ray beam at 7 nanometers, et al[J]. *Science*, 1997, **276**: 1097.

[6] Zhang J, MacPhee A G, Nilsen J, et al Demonstration of saturation in Ni-like Ag X-ray laser at 14nm [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**: 3856

[7] Sebban S, Daido H, Sakaya N, et al Full characterization of a high-gain saturated X-ray laser at 13.9nm [J]. *Phys Rev A*, 2000, **61**: 043810

[8] Ress D, DaSilva L B, London R A, et al Measurement of laser-plasma electron density with a soft X-ray laser deflectometer[J]. *Science*, 1994, **65**: 514

[9] DaSilva L B, Jr Barbee T W, Cauble R, et al Electron density measurements of high density plasma using soft X-ray laser interferometry, et al[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**: 3991.

- [10] 王琛, 傅思祖, 顾援, 等. 用于高温等离子体电子密度测量的摩尔偏折仪[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(4): 467. (Wang C, Fu S Z, Gu Y, et al. A moiré deflectometer used to measure high temperature plasma electron density. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(4): 467)

Experimental studies of Ni-like Ag X-ray laser and its application

WANG Chen¹, GU Yuan¹, WANG Shi-ji¹, HUANG Guan-long², L N Zun-qi², ZHANG Guo-ping³

(1. *Shanghai Institute of Laser Plasma, National Laboratory on High Power Laser and Physics, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;*

2. *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, National Laboratory on High Power Laser and Physics, P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China;*

3. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)*

Abstract The experimental studies of Ni-like Ag X-ray laser and plasma diagnosis by moiré deflection method were performed with Shenguang II laser facility. The saturated output of Ni-like Ag X-ray laser and the moiré deflectogram including the electron density information of the target plasma were obtained.

Key words Ni-like Ag X-ray laser; saturated gain; plasma electron density diagnosis

“神光 II 号”研制成功

据《科学时报》最近报道, 由我国自行研制的中国“神光 II 号”巨型激光装置目前研制成功, 该设备在 0.1ns 的瞬间可发射出相当于全球电网数倍的强大能量, 类似的物理条件在自然界中只有在核爆炸中心、恒星内部或是黑洞边缘才存在。

建在中国科学院上海光机所的“神光 II 号”装置, 由成百万台光学设备集成在一个足球场大小的空间内。当 8 束强激光通过空间立体排布的放大链聚集到一个小小的燃料靶球时, 在 0.1ns 的超短瞬间内可发射出相当于全球电网电力总和数倍的强大功率, 从而释放出极端压力和高温, 引发聚变反应。

“神光 II 号”巨型装置可用作科学实验, 其释放的巨大能量在实验中产生的极端物理条件, 对基础科学研究、高技术应用和确保国家安全的新技术的推出, 均具有重大意义。这种巨型激光器的未来前景也十分诱人。据专家介绍说, 核聚变是未来清洁能源的希望所在, 估计到本世纪中叶, 科学家可望利用激光聚变技术, 把海水中丰富的同位素氘、氚转化为巨大的、取之不尽的能源。

“神光 II 号”的问世标志着我国高功率激光科研和激光核聚变研究已进入世界先进行列。目前, 只有美国、日本、法国、俄罗斯等少数国家能建造如此精密的巨型激光器。“神光 II 号”的总体技术性能已经进入世界前五位。(汪道友)