

水靶激光等离子体光源 11~20 nm 波段光谱实验

齐立红^{1,2}, 李忠芳^{1,2}, 尼启良³, 陈波¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学 原子与分子物理研究所, 吉林 长春 130026)

摘要: 实验以水为靶材, Nd:YAG 激光器为照射激光构成激光等离子体光源, 产生软 X 射线-极紫外辐射。利用 McPHERSON 247 型掠入射软 X 射线-真空紫外单色仪、AXUV100 硅光电二极管, 测量了 11~20 nm 波段水靶激光等离子体光源的光谱。实验表明, 在 11~20 nm 波段水靶激光等离子体光源存在多条线谱, 均由水中氧离子电子跃迁产生。所用单色仪光谱分辨率 $\Delta\lambda \leq 0.075$ nm, 波长扫描间隔 0.5 nm。另外, 采用在喷嘴处加热的办法, 很好地解决了水进入真空系统后绝热膨胀与蒸发过程中温度骤降而结冰的问题, 有效地抑制了喷射距离缩短, 克服了等离子体对喷嘴腐蚀严重的问题。

关键词: 激光等离子体光源; 光谱测量; 软 X 射线; 水靶

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

Experimental study of the spectrum at 11~20 nm of a laser-produced plasma source using water target

QI Li-hong^{1,2}, LI Zhong-fang^{1,2}, NI Qi-liang³, CHEN Bo¹

(1. *National Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Institute of Atomic and Molecular Physics, Jilin University, Changchun 130026, China*)

Abstract: A laser-produced plasma(LPP) source is built with water as target and a Nd:YAG laser as irradiate laser, the radiation of the LPP source at 11~20 nm is measured with an AXUV100 silicon photodiode combined with a McPHERSON model 247 grazing incidence monochromator, of which the monochromator resolution is $\Delta\lambda \leq 0.075$ nm, and the wavelength scanning interval is 0.5 nm. The experimental result demonstrates that the water target LPP source has EUV emission at 11~20 nm wavelength, which are all generated from electronic transitions in oxygen ions. In addition, to solve the erosion problem caused by the short distance between the laser-water action point and the nozzle,

the distance is lengthened by heating the nozzle to reduce the effect caused by the evaporation and the adiabatic expansion.

Key words: laser-produced plasma source; spectral measurement; soft X-ray; water target

1 引言

激光等离子体光源在软 X 射线-极紫外波段是一种性能优异的高亮度光源,预期在极紫外光刻、显微术等领域能够得到应用。到目前为止已经先后有多种激光等离子体软 X 射线光源在实验室研制成功^[1-3]。但是有两个问题限制了此种光源的应用,即碎屑污染与光源的运行费用。为解决前一个问题研究人员先后研制了气体靶与液体靶光源;降低激光等离子体光源的费用问题目前则围绕使用何种类型的靶材展开研究。与常见的金属靶铜及用作气体靶的稀有气体相比,水是最廉价的靶材,如果水能够作为激光等离子体光源的靶材,势必大大降低光源的运行成本,同时满足减少碎屑污染的要求^[4-5]。研究人员关心的另外一个重要问题是如何提高光源的亮度问题,这一问题的解决也伴随着对多种靶材的尝试。因此本文使用水作为靶,构成激光等离子体光源,对其在软 X 射线-极紫外波段的辐射进行了研究,测量了水靶激光等离子体光源在 11~20 nm 波段的光谱。

2 实验工作

2.1 光源

图 1 为激光等离子体光源装置简图。本实验中所使用的激光器为一台 Continuum Powerlite PL9010 型 Nd:YAG 激光器(脉宽 9 ns、频率 10 Hz、波长 1.064 μm 、能量 1 J/脉冲、焦点功率密度最大可达 $8.0 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$)。

用作靶的水是化学实验中使用的去离

子水,在外接高压气体提供的 3040 kPa 左右的压力作用下喷射到真空室中。真空室连接机械泵及分子泵,并采用差分方法来维持单色仪主真空室内的真空度。

水从高压腔进入到真空室的过程是真空绝热膨胀的过程,从喷嘴到激光束聚焦点处会发生蒸发,水温骤降,容易在喷嘴下方近距离处形成冰,即使没有结冰,喷出的水滴距喷嘴距离也会变短。如果激光聚焦点位置保持不动,水滴到达激光聚焦点时会因为自身过于膨胀导致其体密度过低,降低所产生的等离子体的 EUV 的辐射量。为此需要向靠近喷嘴处调整激光聚焦点的位置,形成的等离子体对喷嘴的腐蚀作用会很明显。光源长期工作,一是对喷嘴造成损坏,另外对周围光学元件也造成了污染。为了解决这一问题,本实验在喷嘴的外侧缠绕加热丝,对喷嘴内的水先加热,使其温度升高。这样即使在喷射到真空室后水温度降低,仍然可以使其保持在液态,增加了喷射距离。然后调整聚焦镜,使激光束的焦点调整到离喷嘴较远的位置。

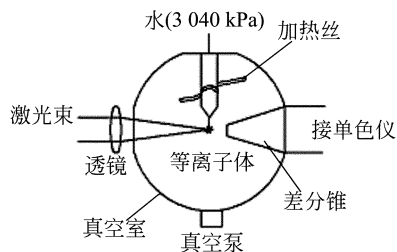


图 1 光源示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LPP source

2.2 光谱测量

光谱测量装置由单色仪、探测器及放大电路等部分构成,如图 2 所示。

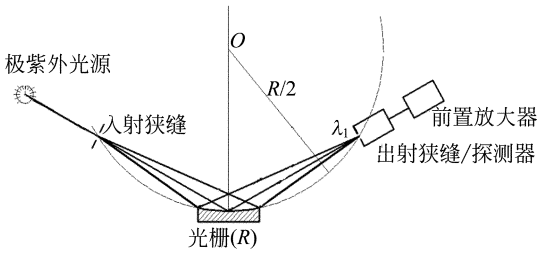


图 2 测量装置简图

Fig. 2 Experimental setup

单色仪为 McPHERSON 247 型掠入射软 X 射线-真空紫外单色仪,配 600 lp/mm 闪耀光栅(曲率半径 2.217 m,刻划面积 30 mm×50 mm,闪耀角 $2^{\circ}4'$),入射角 88° 、狭缝宽度 $10\ \mu\text{m}$ 时光谱分辨率为 0.015 nm,波段范围 0~125 nm,出射狭缝与探测器共同沿罗兰圆作扫描运动,出射狭缝定位精度为 0.025 4 mm。

本实验中所使用的探测器为 AX-UV100 硅光电二极管^[6]。由于信号较弱,还使用电荷灵敏前置放大器来进一步放大 AXUV100 的输出信号^[1]。由放大器输出的信号经美国 NI 公司的 NI-DAQ6023E 型数据采集卡转换成数字信号并由基于 NI-LabVIEW 的 VI 程序^[7]处理并保存在 PC 机中。

3 实验结果及分析

实验中利用温度控制器控制加热丝先将水温升高至 70°C 左右,并在实验过程中保持稳定。调整后激光聚焦点距离喷嘴 10 mm,实验数据是在此条件下测量得到的。图 3 是测得的水靶激光等离子体光源的光谱曲线。

从图中可以看到水靶激光等离子体光源在这一波段存在线谱。由于水中氢离子的电离能是 13.6 eV,氢离子能够产生的辐射的最短波长是 90 nm,所以光源在这一波段产生的光谱都由氧离子产生。图中 5 条

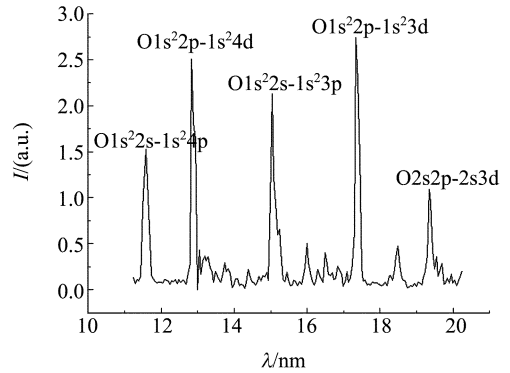


图 3 水靶极紫外激光等离子体光源光谱

Fig. 3 EUV emission spectra obtained from water target LPP source

最强谱线分别对应^[1,8] $1s^22s-1s^24p$ (11.58 nm)、 $1s^22p-1s^24d$ (12.98 nm)、 $1s^22s-1s^23p$ (15.01 nm)、 $1s^22p-1s^23d$ (17.30 nm) 和 $2s2p-2s3d$ (19.37 nm) 氧离子能级跃迁。激光等离子体光源发光与很多参数有关,其中激光焦点处功率密度是一个很重要的参数。文献^[6]中指出最佳的激光功率密度是在 $10^{11}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 到 $5 \times 10^{11}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 之间,实验中所使用的激光器可以满足这一要求,从实验结果来看,激光器的能量能够满足要求,等离子体的温度达到产生类氢和类锂离子的程度。如果提高激光束的质量,优化焦斑大小,改变喷嘴粗细,使彼此之间匹配,就能够提高等离子体温度,使类氢和类锂离子占据优势,进一步提高系统在某一特定波段的 EUV 辐射的能量转换效率^[9]。

4 结论

设计了一种水靶激光等离子体光源,测得了其在极紫外波段的光谱。在这一波段,由氧离子可以产生多条线谱,其中在 13 nm 附近有一条谱线,可以应用于极紫外光刻技术领域。这表明水作为一种廉价的靶材料,可以应用于激光等离子体极紫外

光源,能够同时满足不产生碎屑污染而又降低运行成本的要求。目前阶段的测量还是初步结果,以后将在此基础上围绕进一步提高靶的稳定性、提高激光打靶处能量以及提高光源转换效率等方面展开深入研究。

参考文献:

- [1] 尼启良. 液体微滴喷射靶激光等离子体软 X 射线源研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2003.
NI Q L. *Study on laser-produced plasma soft X-ray source with liquid aerosol spray target* [D]. Thesis P D, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [2] BJORN A M, HANSSON M B, OSCAR H G, *et al.* Xenon liquid-jet laser-plasma source for EUV lithography[J]. *SPIE*, 2000, 3997:729-732.
- [3] MOCHIZUKI T, SHIMOURA A, AMANO S, *et al.* Compact high-average-power laser-plasma X-ray source by cryogenic targets[J]. *SPIE*, 2001, 4504:87-96.
- [4] LIN J Q, YASHIRO H, AOTA T, *et al.* EUV generation using water droplet target[J]. *SPIE*, 2004, 5374:906-911.
- [5] VOGT U, STIEL H, WILL I. Scaling-up a liquid water jet laser plasma source to high average power for extreme ultraviolet lithography[J]. *SPIE*, 2001, 4343:87-93.
- [6] 曹继红, 尼启良, 陈波. 用 Si 光电二极管标定软 X 射线探测器[J]. *光学精密工程*, 2004, 12 (1): 118-121.
CAO J H, NI Q L, CHEN B O. Calibration of soft X-ray detector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12 (1): 118-121. (in Chinese)
- [7] 曹继红, 尼启良, 巩岩. 虚拟仪器实现极紫外波段光谱数据采集和处理[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6 增): 103-106.
CAO J H, NI Q L, GONG Y, *et al.* Data acquisition and processing in EUV with labview program[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6 suppl): 103-106. (in Chinese)
- [8] JIN F, RICHARDSON M. New laser plasma source for extreme-ultraviolet lithography[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(25): 5750-5760.
- [9] JIN F, RICHARDSON M, SHIMKAVEG G, *et al.* Characterization of a laser plasma water droplet EUV source[J]. *SPIE*, 1995, 2523: 81-87.

作者简介:齐立红(1977—),女,吉林公主岭人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为激光等离子体软 X 射线光源的研制、探测。qilihong@126.com