

文章编号 1004-924X(2006)06-0939-05

Xe 液体微滴靶激光等离子体光源实验

尼启良

(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)

摘要:基于 Xe 的惰性和在 13~14 nm 波段高的辐射强度, Xe 被认为是极紫外投影光刻(EUVL)潜在的靶材, 为此设计和研制了一台液体微滴喷射靶激光等离子体(LPP)极紫外光源。详细地研究了 Xe 液体微滴喷射靶的光谱辐射特性、在 13.4 nm 的激光-EUV 转换效率、辐射稳定性及碎屑产生状况。实验结果表明, Xe 在 13.4 nm 的最高转换效率可以达到 $0.75\%/2\pi\text{sr}/2\%\text{bw}$, 辐射稳定性 $\pm 4\%(1\sigma)$, 在激光打靶 10^5 次后无碎屑产生。

关键词: Xe 液体微滴喷射靶; 激光等离子体光源; 极紫外投影光刻

中图分类号: TN241; TL653 **文献标识码:** A

Experimental investigation on a laser-produced plasma source with liquid aerosol spray target

NI Qi-liang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Xenon is a promising target material in Extreme Ultraviolet Lithography(EUVL) for its high EUV intensity in 13~14 nm and no condensation on multilayer mirror surfaces due to chemical inert, and therefore a Laser Produced Plasma(LPP) source with liquid aerosol spray target is designed and developed in this paper. The spectral radiation characteristics, laser-to-EUV conversion efficiency at 13.4 nm and debris production by target material erosion or deposition of the liquid Xe aerosol spray target are studied in detail. Experimental results show that the maximum conversion efficiency of Xe is $0.75\%/2\pi\text{sr}/2\%\text{bw}$ at 13.4 nm, and pulse-pulse stability is $\pm 4\%(1\sigma)$ at 0.5 mm laser-nozzle distance, the results also show that liquid Xe aerosol spray target LPP source can almost eliminate debris after 10^5 laser shots.

Key words: Xe liquid aerosol spray target; Laser-produced Plasma(LPP) source; Extreme Ultraviolet Lithography(EUVL)

1 引言

目前,低碎屑激光等离子体光源的最主要应用领域是极紫外(EUV)投影光刻,特别是以激光等离子体为光源的掩模缩小成像的投影式 EUV 光刻,其刻划的最小特征尺寸可达 $0.035\ \mu\text{m}$,因此这种光刻技术被认为是本世纪初信息产业中生产高集成度计算机芯片的最佳方法之一。EUV 投影光刻最常用的两个波长是 $11.3\ \text{nm}$ 和 $13.4\ \text{nm}$ ^[1-3],因为极紫外 Mo/Be 多层膜在 $11.3\ \text{nm}$ 处的反射率达到 67%,Mo/Si 多层膜在 $13.4\ \text{nm}$ 的反射率达到 65%,均接近理论设计和计算的反射率。但是 Be 是一种有毒的金属,对镀膜者会带来一定的危害,因此, $13.4\ \text{nm}$ 就成为国际上通用的 EUV 投影光刻波长。低碎屑 Xe 液体微流靶激光等离子体光源被认为是最有希望的候选光源之一。首先 Xe 是高 Z 元素,有较高的激光-EUV 转换效率,同时 Xe 也是惰性气体,不会与光学元件表面起任何化学反应;其次,使用液体微滴喷射靶更有利于激光能量的吸收,提高激光-EUV 转换效率。为此本文设计和研制了一台 Xe 液体微滴喷射靶激光等离子体极紫外光源,并对 Xe 液体微滴靶 LPP 光源在 $6\sim 22\ \text{nm}$ 波段的光谱辐射特性、 $13.4\ \text{nm}$ 多层膜带宽内的激光-EUV 转换效率、辐射稳定性及碎屑产生状况进行了详细研究。

2 液体微滴喷射靶 LPP 光源的工作原理及结构

本文设计和研制的液体微滴喷射靶 LPP 光源由可连续控温的电磁喷气阀、YAG 激光器、信号脉冲发生器和气体收集器组成,其工作原理和结构如图 1 所示。由信号发生器产生的三个脉冲按照一定的时序分别触发激光器的 Xe 灯、Q 开关和电磁阀,使激光束正好聚焦在阀门喷出的液体微滴上,产生辐射软 X 射线的激光等离子体。选取美国通用阀公司的系列 99 型电磁喷气阀门作为制冷对象,这种阀门可使用任何无腐蚀性的流体,其阀体使用金属密封,在极低的温度下流体的漏率小于 $1\times 10^{-8}\ \text{mL/s}$ 。使用液氮作制冷剂可以把阀门制冷到足够低的温度。工作时液氮不

间断地流过缠绕在阀体外部直径为 $3\ \text{mm}$ 的螺旋状铜管,阀门的温度会逐渐地降低并趋近液氮的温度。因铜具有良好的导热性,所以在阀体和铜管之间夹了一层厚度 $2\ \text{mm}$ 的金属铜来提高制冷速度。在铜层内安装一个铂温度计,用来测量整个阀体的温度,控温仪可以显示这一温度。为了获得所需的工作温度,在铜管的外面缠绕了钨丝作为加热器,加热器根据控温仪设定的温度自动地加热阀门使之接近设定的温度。适当地控制液氮的流量,阀门的温度就会固定在设定的温度。温度控制在 $77\sim 473\ \text{K}$ ($-196\ ^\circ\text{C}\sim 200\ ^\circ\text{C}$),其精度为 $0.2\ \text{K}$ 。

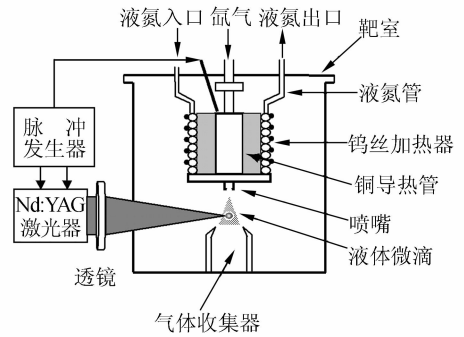


图 1 液体微滴喷射靶 LPP 光源的工作原理及结构图
Fig. 1 Structural and operating principle illustration of liquid aerosol jet LPP source

3 LPP 软 X 射线光源光谱测量

LPP 软 X 射线光源光谱测量装置由 Mcpherson 247 型单色仪和探测系统(包括探测器及其放大电路)两部分组成,如图 2 所示。

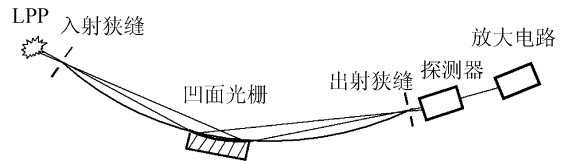


图 2 激光等离子体光谱测量装置简图
Fig. 2 Schematic diagram of setup for spectra measurement of LPP

Mcpherson 247 型单色仪的入射狭缝、出射狭缝、凹面光栅在同一罗兰圆上。使用 $600\ \text{lp/mm}$ 光栅,实验时出入狭缝宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,光谱分辨率小于 $0.1\ \text{nm}$ 。光栅曲率半径

2.217 m, 有效面积 30 mm × 50 mm。入射角为 88° 时, 波段为 1~125 nm。

所用 Nd:YAG 激光器的参数如下: 脉冲宽度 7 ns、工作频率 10 Hz、基频波长 1.064 μm、二倍频为 0.533 μm, 基频每个脉冲的能量为 1 J、二倍频每个脉冲能量为 450 mJ。一个焦距 75 mm 的双凸透镜将激光聚焦在喷嘴的正下方, 一倍频和二倍频对应的焦点激光功率密度分别为 8×10^{11} W/cm² 和 3.75×10^{11} W/cm²。所用探测器为光电二极管 AXUV-100G, 一个由电荷灵敏前置放大器、脉冲整形放大器及其峰值保持器组成的放大电路用来测量每个激光脉冲使光电二极管所产生的电脉冲信号。具体的测量方法见参考文献 [4-5]。图 3 给出了液体 Xe、Kr 在相同条件下在 6~22 nm 的光谱测量结果, 从图中可以看到, 在 13.4 nm 附近, 液体 Xe 产生的极紫外辐射远大于液体 Kr 产生的极紫外辐射。在实验的基础上, 使用原子光谱分析常用的 Cowan 程序, 计算了液体 Xe 在 $10^{11} \sim 10^{12}$ W/cm² 激光功率密度下可能相应产生的 Xe⁹⁺-Xe¹⁷⁺ 离子的电偶极辐射波长和跃迁几率。结合上面的液体 Xe 光谱测量结果发现, 13.4 nm 波长辐射来自 Xe¹⁰⁺ 的 4d-5p 跃迁。

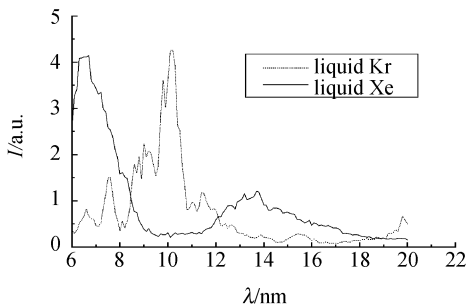


图 3 Xe 和 Kr 液体微滴喷射靶 LPP 源光谱
Fig. 3 Spectrum of Xe and Kr liquid aerosol spray jet target LPP

4 激光-EUV 转换效率测量结果

图 4 给出了测量 Xe 液体微滴喷射靶光源激光-EUV 转换效率的装置简图。激光等离子体产生的 EUV 辐射以 10° 的入射角入射到有效孔径为 30 mm、中心波长在 13.4 nm 的 Mo/Si 多层膜上, 光源到多层膜反射镜中心的距离是 130 mm。多层膜的带宽 (FWHM) 为 0.6 nm, 在 13.4 nm 的峰值反射率为 24%。多层膜反射 13.4 nm 附

近带宽内的 EUV 及紫外、可见光和红外辐射。一个 IRD 公司的传递标准光电二极管 AXUV-100Ti/Zr/C/6/200/50 nm 用来测量被多层膜反射的 EUV, 二极管面积 10 mm × 10 mm, 其中心距离多层膜中心 70 mm。由于光电二极管前表

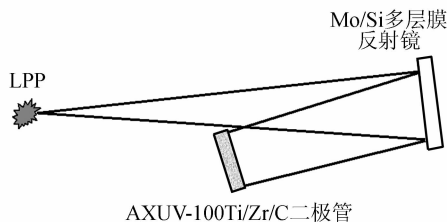


图 4 测量液体微滴喷射靶光源转换效率装置图
Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup for measuring conversion efficiency of LPP source with liquid aerosol jet target

面有 Ti/Zr/C/6/200/50 nm 薄膜作为滤光片, 紫外、可见光和红外辐射将全部被滤掉。从二极管输出的电脉冲信号被送入示波器, 目的是为了测量由光电二极管产生的电荷量。在测得每个脉冲产生的电量后, 根据已知的 AXUV-100Ti/Zr/C 灵敏度数据或曲线可以计算出光源在 Mo/Si 多层膜带宽内探测器对光源所张立体角内单个脉冲产生的 EUV 能量, 据此可以计算出光源在 13.4 nm 的转换效率。由于多层膜的带宽 (bw) 仅有 0.6 nm, 所以在此带宽内 AXUV-100Ti/Zr/C 的灵敏度可以认为是一常数, 等于 13.4 nm 处的灵敏度。在 13.4 nm 处 AXUV-100Ti/Zr/C 光电二极管的灵敏度为 $R_e = 0.08$ C/J。因为多层膜反射率曲线下的面积 $AREA = bw \cdot R_{max}$, R_{max} 是多层膜中心波长处的反射率, 因此, 在转换效率计算过程中多层膜通常可以看作为一个带通滤光片, 在其 bw 内的所有波长都具有反射率 R_{max} 。如果 AXUV-100Ti/Zr/C 产生的电量为 Q , 在单位立体角内每个激光脉冲光源在多层膜 bw 内产生的 EUV 能量 $\epsilon = Q / (\Omega \cdot R_e \cdot R_{max})$, Ω 是光源对探测器所张的立体角, 如果用于产生激光等离子体的每个激光脉冲的能量是 E_{pulse} , 光源在 13.4 nm 处 2π 立体角内的转换效率可以用下面的公式计算:

$$\eta_{pulse} (\% / 2\pi sr / bw) = \frac{\epsilon}{E_{pulse}} = \frac{2\pi \cdot Q}{\Omega \cdot R_e \cdot R_{max} \cdot E_{pulse}} \quad (1)$$

通常转换效率定义在多层膜带宽的 2% 以内,即 $\eta_{\text{pulse}} (\%/2\pi\text{sr}/2\% \text{bw})$ 。所谓 2% bw 就是 $2\% \lambda_0$, 其中 λ_0 是多层膜中心波长,在此处 $\lambda_0 = 13.4 \text{ nm}$, 因此 $2\% \text{bw} = 0.268 \text{ nm}$, $\eta_{\text{pulse}} (\%/2\pi\text{sr}/2\% \text{bw}) = 44.7\% \eta_{\text{pulse}} (\%/2\pi\text{sr}/\text{bw})$ 。

测量了 Xe 液体微滴靶光源在优化的打靶条件下 13.4 nm 处的转换效率,实验结果见图 5~7。

图 5 是 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随阀门喷嘴温度变化曲线,激光焦点与喷嘴的距离是 0.5 mm, 阀门内背景气压 1 MPa。从图上可以看出,阀门温度从 -55 °C 降低到 -75 °C, Xe 的转换效率呈上升趋势。

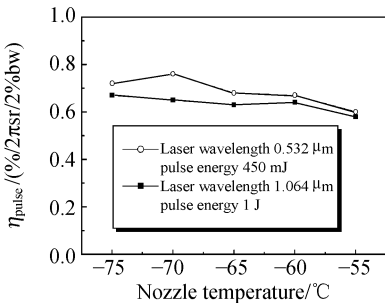


图 5 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随阀门喷嘴温度的变化
Fig. 5 Conversion efficiency of Xe liquid aerosol target LPP source at 13.4 nm vs. nozzle temperature

图 6 是 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随阀门内背景气压变化曲线,激光焦点与喷嘴的距离是 1 mm。测量结果表明阀门背景气压对转换效率影响很小。

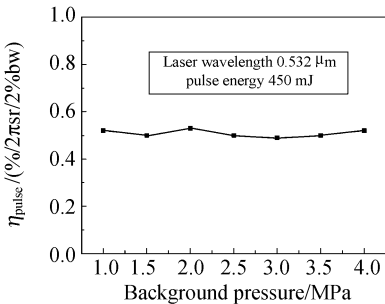


图 6 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随阀门内背景气压的变化
Fig. 6 Conversion efficiency of Xe liquid aerosol target LPP source at 13.4 nm vs. background pressure

图 7 是 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随激光焦点-喷嘴距离变化曲线。背景气压 1 MPa, 阀门温度为 -75 °C。测量结果表明焦点到喷嘴间的距离对转换效率影响很大,并且距离越短,转换效率越大。

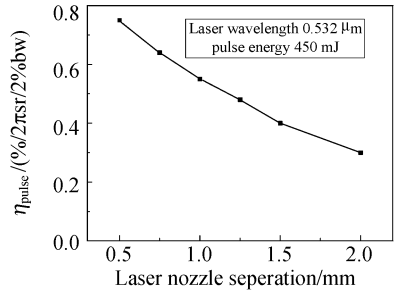


图 7 Xe 液体靶在 13.4 nm 的转换效率随激光焦点-喷嘴距离的变化
Fig. 7 Conversion efficiency of Xe liquid aerosol target LPP source at 13.4 nm vs. laser nozzle distance

5 Xe 液体微滴喷射靶 LPP 光源辐射稳定性和碎屑污染测量

在实验中对 Xe 液体微滴喷射靶 LPP 光源的软 X 射线辐射稳定性进行了测量。把单色仪的波长固定在 13.4 nm, 以 10 Hz 不间断地打靶 1.4×10^5 次, 测得的信号强度随打靶次数变化的曲线如图 8 所示。从测量的数据可得到如下结论: Xe 液体微滴喷射靶 LPP 光源在 13.4 nm 的光谱辐射稳定性约为 $\pm 4\% (1 \sigma)$ 。引起液体微滴

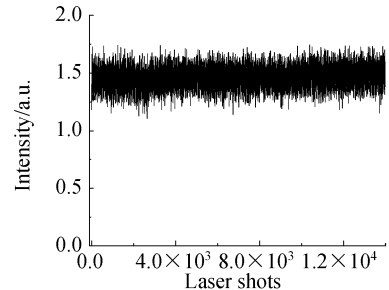


图 8 Xe 液体微滴喷射靶 LPP 源的软 X 射线输出稳定性
Fig. 8 Stability of X-ray emission from Xe liquid aerosol jet LPP source

喷射靶 LPP 光源软 X 射线输出稳定性的主要原因有激光器能量输出的脉冲-脉冲稳定性、指向稳定性、喷气阀门的工作稳定性等因素。本实验中使用的 Nd:YAG 激光器的能量输出稳定性为 $\pm 2.5\%$, 指向稳定性是激光焦点大小的 $1/20$ 。要想获得更高的输出稳定性首先要提高激光器的能量输出稳定性及指向稳定性, 其次要使用喷气状态更稳定的连续喷射工作方式。

为了尽可能减少 Xe 液体微滴喷射靶 LPP 光

源的碎屑, 在光源的设计上使用将不锈钢喷嘴面向等离子体的部分用石墨包裹起来并最小化这部分面积这一简单易行的方法。在距离喷嘴 100 mm 处放置一个 Mo/Si 多层膜来检测光源对多层膜的溅射情况, 激光聚焦在喷嘴下方 2 mm 处, 打靶次数 10^5 , 实验结果如图 9 所示。图 9(a) 是铜靶对多层膜的溅射照片 (仅打靶 100 次), 图 9(b) 是没有石墨的不锈钢喷嘴对多层膜的溅射结果, 图 9(c) 是石墨对多层膜的溅射结果。

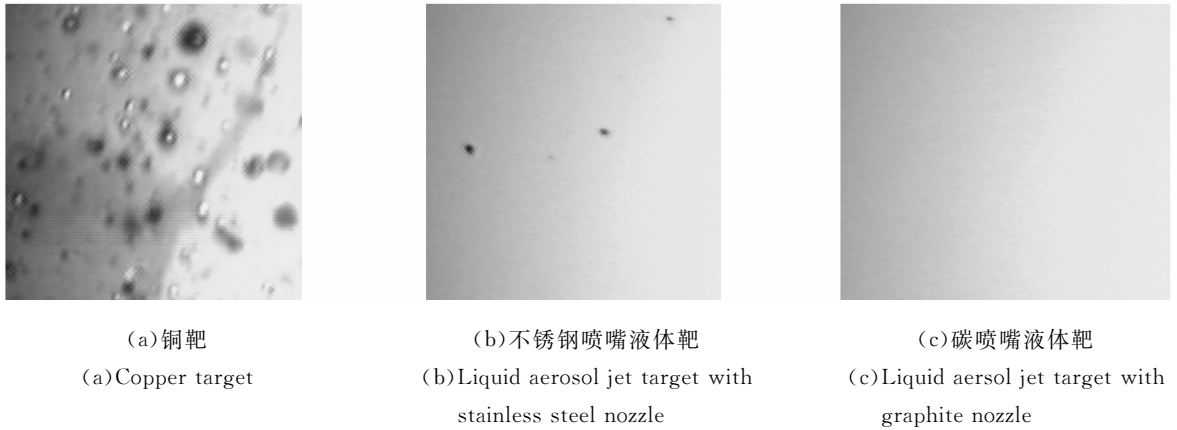


图 9 铜靶与使用不锈钢喷嘴和碳喷嘴的液体靶产生的碎屑比较

Fig. 9 Debris comparison between copper target and liquid aerosol jet target with stainless steel and graphite nozzle

6 结 论

(1) Xe 液体微滴喷射靶激光等离子体极紫外光源是一种低碎屑、高亮度、稳定性较高的脉冲光源; (2) Xe 激光等离子体所产生的 13.4 nm 波长

辐射来自 Xe^{10+} 的 $4d-5p$ 跃迁; (3) 在优化的激光打靶条件下, Xe 液体微滴喷射靶光源在 13.4 nm 附近激光-EUV 转换效率与阀门温度、激光焦点-喷嘴距离有关, 其最高转换效率为 $0.75\%/2\pi\text{sr}/2\% \text{bw}$ 。

参考文献:

- [1] LEBERT B, BERGMANN K, JUSCHKIN L, *et al.* Comparison of different source concepts for EUVL[J]. *SPIE*, 2001, 4343:215-225.
- [2] BALLARD W P, BERNARDEZ L J, LAFON R E, *et al.* High-power laser-produced-plasma EUV source[J]. *SPIE*, 2002, 4688:302-309.
- [3] KOMORI H, IMAI Y, SOUMAGNE G, *et al.* Magnetic field ion mitigation for EUV light sources[J]. *SPIE*, 2005, 5751:859-866.
- [4] 尼启良. 纳秒激光等离子体光源的光谱测量技术[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(2):212-217.
NI Q L. Technology for measuring spectrum from nanosecond laser plasma soft X-ray source[J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2005, 13(2):212-217. (in Chinese).
- [5] 尼启良, 巩岩, 陈波, 等. 激光等离子体软 X 射线源光谱强度测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004, 24(1):1-3.
NI Q L, GONG Y, CHEN B, *et al.* The method to measure spectrum intensity from nanosecond laser plasma soft X-ray source[J]. *Spectros. Spect. Anal.*, 2004, 24(1):1-3.

作者简介: 尼启良 (1966—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 副研究员, 现在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从事软 X 射线和紫外光学研究工作。E-mail: niqilian@yahoo.com