毛细管内径对 Xe 气放电极紫外光源的影响

徐 强,赵永蓬,李小强,李 琦,王 骐

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 极紫外光源功率是影响光源使用的关键参数,研究放电等离子体 EUV 光源等离子体时间特性,优化放电结构和光源功率具有重要意义。理论上计算了不同内径毛细管内等离子体压缩过程和收集效率,实验上采用极紫外探测器测量了毛细管内径对 Xe 气极紫外光源 13.5 nm(2%带宽)辐射输出时间特性的影响,分析了毛细管内径对等离子状态的影响。结合该系统光学收集系统设计参数、不同内径毛细管收集效率和极紫外探测器信号强度,给出了不同内径毛细管中间焦点处 13.5 nm(2%带宽)光功率比。结果表明:气压 7 Pa、电流 28 kA 时,毛细管内径 7 mm 条件下,光源中间焦点处光功率最优化。

关键词: 毛细管放电; 极紫外光刻光源; Xe 等离子体; 13.5 nm 辐射; Z 箍缩

中图分类号: TN23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2873-05

Influence of capillary inner radius on Xe gas discharge extreme ultraviolet source

Xu Qiang, Zhao Yongpeng, Li Xiaoqiang, Li Qi, Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The power of the 13.5 nm (2% bandwidth) emission is one of the key parameter for the EUV source. It′s important to study the temporary of the plasma in the capillary, which is useful to optimize the discharge structure and the EUV source power. In this paper, the pinch process of the plasma and the collection efficiency under different inner radiuses of the capillary were calculated theoretically. And the influence of the inner radius of the capillary on the dynamic condition of the 13.5 nm (2% bandwidth) emission was detected by a EUV monitor, which was used to analyze the influence of the inner radius of the capillary on the pinch process of the plasma. By combing the theoretical and experimental results with the design of collectors in this system, the 13.5 nm (2% bandwidth) emissions at the IF point were calculated under different inner radius of the capillary. The results show that the optimal of the power at the IF point has been got with the inner radius of the capillary 7 mm, the Xe gas pressure 7 Pa and discharge current 28 kA.

Key words: capillary discharge; extreme ultraviolet source; Xe plasma; 13.5 nm emission; Z pinch

收稿日期: 2014-01-07; **修订日期:** 2014-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(60838005);国家科技重大专项(2008ZX02501)

作者简介: 徐强(1984-),男,博士生,主要从事极紫外光刻光源方面的研究。Email:hgdxq@126.com

导师简介: 赵永蓬(1973-),男,教授,主要从事 X 射线激光及极紫外光刻光源方面的研究。Email:zhaoyp3@hit.edu.cn

0 引 言

目前主要采用 193 nm 浸没式光刻实现 32~22 nm 刻线[1],但采用 13.5 nm(2%带宽) 辐射光的极紫外(EUV) 光刻技术可以更容易用于实现 22 nm 或更短特征波长的光刻处理中。在这里选用 13.5 nm 的辐射光主要是因为,已经能够生产的 EUV 光刻系统用的 Mo/Si 多层反射镜在这个波长有非常高的反射率(~70%),同时性能稳定。极紫外光刻光源主要沿着激光等离子体(LPP)[2]光源和放电等离子体(DPP)光源[3]方向发展,光源功率仍是限制 EUV 光刻技术大规模产业化的重要因素[4]。

EUV 光源等离子体沿 4π 立体角辐射输出,光能在较大的孔径范围内分布, 而光刻照明系统的数值孔径一般较小[5],需要光学收集系统将光聚焦在中间焦点(IF 点)处,随后经过投影系统[6]对芯片刻蚀。输入电能、光源转换效率和收集系统收集效率决定了 IF 点功率。对于毛细管放电等离子体 EUV 光源,转换效率由放电介质类型[7]、放电介质气压、放电电流[3]、毛细管尺寸等参数共同决定。为了获得较高的 IF 点功率,需要优化各种放电参数和等离子体状态。目前,各研究小组主要集中在放电介质及气压、放电电流幅值及上升沿等参数对等离子体状态和转换效率影响研究上, 而关于毛细管尺寸对等离子体状态和转换效率影响研究较少。文中通过研究毛细管内径对 13.5 nm(2%带宽)辐射时间特性和收集效率影响,分析毛细管内径对等离子体状态的影响,探讨实现较高 IF 点功率的最优化毛细管内径。

1 实验原理及装置

图 1 为实验室毛细管放电 EUV 光源结构示意图,整套光源包括高压脉冲电源、放电室、真空室、探测系统及抽配气系统等部分。

电源系统采用三级磁脉冲压缩机制工作, 具体电路结构见参考文献[8]。实验时加载在毛细管(内径 5 mm、长度 12 mm)两端的电压为 20~30 kV 可调,流过毛细管的电流为 20~40 kA 可调,电流脉宽(FWMH)约 120 ns。工作时电源高压端与接地端之间放电形成快脉冲大电流, 在自箍缩作用下,Xe 气被压缩形成高温高密度等离子体,从而实现 EUV 辐射输出。

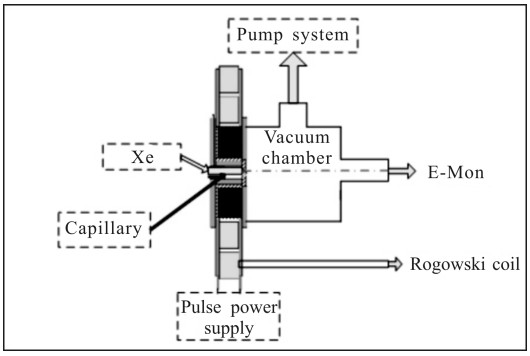

图 1 DPP EUV 光源结构图

Fig.1 Construction drawing of DPP EUV source

图 2 为极紫外探测器(E-Mon)结构示意图,包括一个 Mo/Si 多层反射镜、一个 SiN 金属膜和一个快响应的光电二极管(AXUV20HS1BNC,响应时间 1 ns)。整个探测器位于毛细管中心轴上,距离毛细管端面 50 cm。辐射光经过 Mo/Si 多层镜反射后主要包括两个部分:13.5 nm(2%带宽)和波长大于 25 nm 辐射光。后者经过 SiN 金属膜后被滤除,仅有 13.5 nm (2%带宽)通过 SiN 金属膜。因而,光电二极管测量信号仅包括 13.5 nm(2%带宽)部分,整个 E-Mon 测量的为 13.5 nm(2%带宽)辐射时间特性。其中,光电二极管有效探测半径为 2.5 mm,最大探测外径相对于毛细管中心轴等效夹角为 0.3°。实验时电压通过高压探头测量(Tektronix,P6015A) ,电流采用 Rogowski 线圈测量, 所有的探测仪器都与一个带宽 500 MHz 的数字存储示波器(Tektronix,DPO 3054)相连。整套放电系统与真空系统相连, 从而保证毛细管内部有均匀稳定的 Xe 气。

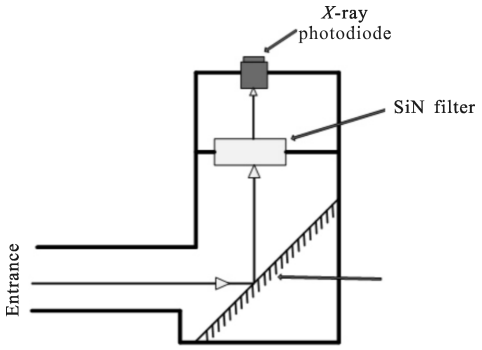

图 2 极紫外探测器结构示意图

Fig.2 Schematic structure of EUV monitor(E-Mon)

2 理论分析

毛细管内径会影响等离子体箍缩过程, 从而影

响 Xe 高价离子产生和 13.5 nm 辐射光输出时间特性。文中采用雪靶模型,模拟电流和气压一定时,不同毛细管内径条件下等离子箍缩过程。对于雪靶模型,等离子体箍缩过程可表示为公式(1)形式[9]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left[\pi\rho_0(a^2-r^2)\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right]=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}+2\pi rP \tag{1}$$

式中:a 为毛细管内径;r 为等离子体在时刻 t 时的半径;ρ_0 为毛细管内初始等离子体密度,其由初始气压和温度决定,文中采用室温 25 ℃,I 为流过毛细管内的电流,这里采用实际测量结果。根据雪靶模型,P 由不同时刻毛细管内等离子体压强 P_{in} 和作用在等离子体上的外部压强 P_{out} 差值决定。文中忽略对毛细管管壁的烧蚀,此时 P_{out} 为零,根据 P. Vrba′s 的观点,在绝热条件下,$p_{in}=p_0(V_0/V)^{5/3}=p_0(r/a)^{10/3}$,其中 p_0 为毛细管内初始气压,V_0 为毛细管内初始状态条件下气体体积。采用四阶 Runge-Kutta 数值解式(1),公式(1)分解为公式(2)和公式(3)[10]:

$$\frac{\mathrm{d}r_1}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi r}+2\pi rP \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}=\frac{r}{\pi\rho_0(a^2-r^2)} \tag{3}$$

均匀分布的 Xe 等离子体是典型的雪耙型内爆,由于趋肤效应,电流主要在 Xe 等离子体外界面薄壳内流过,洛伦兹力驱动薄壳向心加速运动,在等离子第一次压缩过程中可以视为理想的雪靶型等离子体。而当等离子体第一次内爆膨胀之后,流过等离子体的电流变化非常复杂,此时等离子体并不能视为理想的雪靶型等离子体,因而计算结果可能并不准确,文中只分析等离子第一次压缩过程。图 3 为气压 7 Pa 时电流为 28 kA 时,求解公式(2)和公式(3)得到的等离子体尺寸与电流的关系,其中电流波形为实验测量结果。

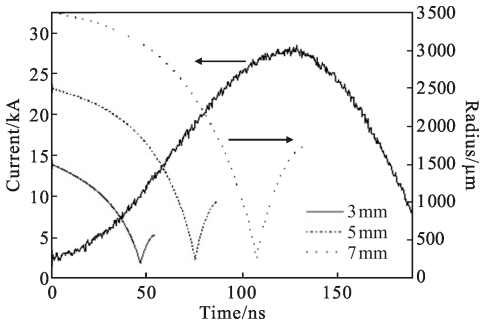

图 3 不同毛细管内径条件下等离子体箍缩半径随电流的变化

Fig.3 Relationship between pinch radius and current under different inner radiuses of the capillary

不同毛细管内径条件下,等离子体最小半径为 200~300 μm,与其他研究小组测量结果吻合,这说明等离子第一次压缩过程中满足雪靶型内爆要求。

由图 3 可以看出,在放电电流 28 kA、Xe 气气压 7 Pa 条件下,毛细管内径为 3 mm、5 mm 和 7 mm 时,等离子体压缩到最小半径的时刻分别为 46.4 ns、75.2 ns 和 107.5 ns。在相同的放电电流和 Xe 气气压条件下,随着毛细管内径的增加,等离子体箍缩到最小半径的时间变长。

为了得到光源中间焦点(IF 点)13.5 nm(2%带宽)辐射光功率,必须考虑光学收集系统的收集效率。极紫外光源 IF 点 13.5 nm(2%带宽)辐射光功率 P 可以表示为 $P=P_{2\pi}\cdot\eta\cdot C_{ol}$ 形式。其中,$P_{2\pi}$ 为光源 2π 立体角辐射功率,由电源功率和转换效率决定。η 为气体透过率,由光源系统真空度决定,在文中暂不考虑。C_{ol} 为光学收集系统收集效率,定义为由极紫外光源发出并被收集系统收集到 IF 点处 13.5 nm(2%带宽)辐射通量与光源在 2π 立体角内发射的辐射通量之比,其中,毛细管内等离子体可以认为是 4π 立体角均匀发射的光源。计算收集系统收集效率时,必须考虑毛细管管壁对辐射光遮挡的影响。毛细管内等离子体长度近似等于电极间距离,假设等离子体径向强度分布满足高斯分布,按照图 3 计算得到的等离子体最小半径,计算可知等离子体强度 95.4%分布在半径为 r_1=350~500 μm 的等离子体柱内。由于 r_1 远小于 a,计算收集镜收集效率时可将等离子体简化为线状等效辐射体。该光源系统光学收集系统设计参数见参考文献[11],图 4 为在收集角为 10°~60°条件下,不同内径毛细管光学收集系统收集效率。由图 4

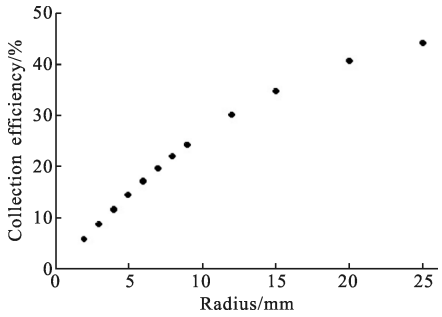

图 4 不同毛细管内径条件下光学收集系统收集效率

Fig.4 Relationship between capillary inner radius and collection efficiency of collectors

可知，对于 3 mm、5 mm 和 7 mm 毛细管，收集效率分别为 8.7%、14.4%和 19.6%，这主要是由于毛细管内径约小，毛细管内等离子体产生的 EUV 辐射光更多地被毛细管管壁遮挡，从而导致光学收集系统收集光效率越低。

3 实验数据及分析

在放电电流28 kA、Xe 气气压为 7 Pa 条件下，采用极紫外探测器(E-Mon)测量不同毛细管内径条件下 13.5 nm(2%带宽)辐射光时间特性。图 5 为毛细管内径为 7 mm 时理论计算等离子体半径与实验测量 E-Mon 信号的关系。图 6 为不同内径条件下 E-Mon 信号随电流的变化。

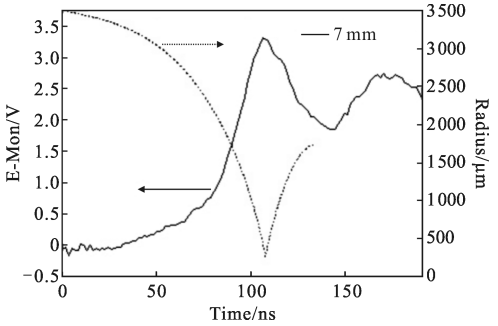

图 5 7 mm 内径毛细管理论和实验结果比较

Fig.5 Comparisons between theory and experimental results for 7 mm capillary

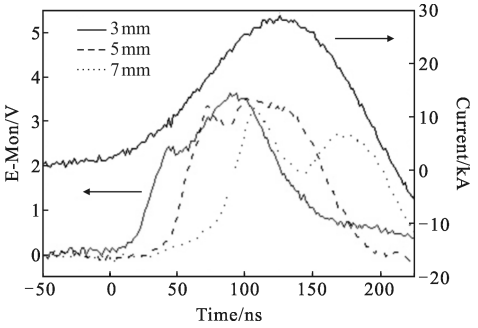

图 6 不同毛细管内径条件下 E-Mon 信号与电流关系

Fig.6 Relationship between E-Mon signals and current under different inner radiuses of capillary

由图 5、图6 可以看出：毛细管内径为 3 mm、5 mm 和 7 mm 时，E-Mon 信号第一个峰值时刻分别 43.6 ns、70.8 ns 和 106.0 ns，与图 3 理论计算得到的等离子体第一次被压缩到半径时的 46.4 ns、75.2 ns 和 107.5 ns 基本吻合。这说明，等离子体第一次被压缩到半径最小时，13.5 nm(2%带宽)辐射强度达到最大，Xe^{10+}离子丰度达到最大值。在等离子体箍缩过程中，电子温度逐渐升高，等离子体半径最小时电子温度达到最大值。这说明等离子体被压缩到最小半径前，Xe^{10+}离子丰度随着等离子体的压缩逐渐增加。根据碰撞-辐射模型[12]，在电子温度未达到实现 Xe^{10+}离子丰度最大值前，随着电子温度的升高，Xe^{10+}离子丰度随之增加。因此，如果在上述放电条件下，等离子体压缩过程中某一时刻，电子温度已经达到 Xe^{10+}离子丰度最优化条件，等离子体半径最小时刻将大于 E-Mon 信号第一个峰值时刻，这与测量结果不吻合。根据碰撞-辐射模型计算结果，对于三种内径毛细管，在初始气压为 7 Pa、初始温度为室温 25 ℃条件下，Xe^{10+}离子最佳温度均为约 29.6 eV。因此，对于三种内径毛细管，在现有放电条件下，等离子体压缩过程中电子温度尚未达到 29.6 eV。为了提高光源转换效率，需要提高电子温度，从而 Xe^{10+}离子丰度达到最佳，这可以通过提高放电电流或减小 Xe 气气压方式实现[13]。而提高放电电流需要提高装置的放电电压，这会导致电源系统设计难度增加，同时装置稳定性差。而放电气压过低时，气体击穿性能差，同时光源功率稳定性差，不能满足光刻机要求。在此条件下，通过改进毛细管结构提高 IF 点功率变得非常重要。

E-Mon 测量信号积分反映了光源 13.5 nm(2%带宽)辐射功率，而比较不同内径毛细管 13.5 nm(2%带宽)辐射功率的相对大小，必须考虑毛细管管壁遮挡对 E-Mon 探测信号的影响。利用几何关系可以判断出，对于三种内径毛细管，轴向对称 7.1°、11.9°和 16.7°角圆锥形空间内辐射信号均能被探测器全部接收，而 E-Mon 探测器等效夹角仅为 0.3°，远小于上述值。因而三种内径毛细管 E-Mon 信号强度积分比等于三种内径毛细管 2π 立体角辐射功率比。由图 5 可以计算得出 3 mm、5 mm 和 7 mm 三种内径毛细管 E-Mon 信号积分比为 232:218:205，而输入电能相等，这说明三种内径毛细管放电时转换效率基本相同。结合图 4 计算得出的光学收集系统收集效率可知，三种内径毛细管 IF 点功率比约为 1:1.5:2，因此，7 mm 内径毛细管更有利于实现 IF 点高功率输出。另一方面，毛细管内径过高，IF 点光斑尺寸过大，不利于 EUV 光刻机中照明系统的设计和使用[5]，同时内径过大会也导致放电时功率稳定性和空间稳定性

变差,这也不能满足 EUV 光源要求。因此,为了获得高功率的稳定输出,同时 IF 点光斑尺寸优化,放电时应选择 7 mm 内径毛细管。

4 结　论

对于 3 mm、5 mm 和 7 mm 内径毛细管，在放电电流 28 kA、Xe 气气压 7 Pa 时,13.5 nm(2%带宽)辐射强度在 43.6 ns、70.8 ns 和 106.0 ns 达到峰值,与理论计算结果吻合，这说明等离子体第一次被压缩到半径最小时,13.5 nm(2%带宽)辐射强度达到最大,此时 Xe^{10+}离子丰度达到最大值，电子温度也达到最大值，结合碰撞辐射模型结果可知等离子体压缩过程中电子温度未达到 Xe^{10+}离子丰度最优化条件。按照该光源系统光学收集系统设计参数，在收集角为10°~60°条件下，三种毛细管收集效率分别为 8.7%、14.4%和 19.6%。结合 13.5 nm(2%带宽)信号强度计算得知,三种内径毛细管 IF 点功率比约为 1:1.5:2,7 mm 内径毛细管更有利于实现 IF 点高功率输出,这一结果有利于 EUV 光源的系统设计和参数选择。

参考文献:

[1] Ma Zhanlong, Wang Junlin. Ultra-precision optical fabrication technology [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(6): 1485-1490. (in Chinese)
马占龙, 王君林. 超高精度光学元件加工技术 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1485-1490.

[2] Deng Changmeng, Geng Yongyou, Wu Yiqun. Research development of laser lithography technology[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(5): 1223-1231. (in Chinese)
邓常猛, 耿永友, 吴谊群. 激光光刻技术的研究与发展[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1223-1231.

[3] Song I, Iwata K, Homma Y, et al. A comparative study on the performance of a xenon capillary Z -pinch EUV lithography light source using a pinhole camera [J]. ***Plasma Sources Science and Technology***, 2006, 15: 322-327.

[4] Zhu Q S, Muto T, Yamada J, et al. Estimation of electron temperature and density of the decay plasma in a laser-assisted discharge plasma extreme ultraviolet source by using a modified Stark broadening method [J]. ***Journal of Applied Physics***, 2011, 110: 123302.

[5] Wang Liping. Optical system of extreme ultraviolet lithography [J]. ***Chinese Journal of Optics and Applied Optics***, 2010, 3(5): 452-461. (in Chinese)
王丽萍. 极紫外投影光刻光学系统[J], 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 452-461.

[6] Ni Mingyang, Gong Yan. Transmission ratio analysis for a lateral adjustment barrel in DUV projection lens[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(12): 3323-3330. (in Chinese)
倪明阳, 巩岩. 深紫外投影物镜偏心调整机构的传动比分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3323-3330.

[7] Kieft E, Garloff K, Van Der Mullen J, et al. Comparison of experimental and simulated extreme ultraviolet spectra of xenon and tin discharges [J]. ***Physical Review E***, 2005, 71(3): 036402.

[8] Lv Peng, Liu Chunfang, Zhang Chaohai, et al. Experimental study on main pulse power supply for dicharge produced plasma extreme ultraviolet source[J]. ***High Power Laser and Particle Beams***, 2010, 22(2): 388-392. (in Chinese)
吕鹏, 刘春芳, 张潮海, 等. 放电等离子体极紫外光源中的主脉冲电源[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(2): 388-392.

[9] Vrba P, Vrbová M. Z-Pinch evolution in capillary discharge [J]. ***Contributions to Plasma Physics***, 2000, 40(5-6): 581-595.

[10] Zhao Y, Cheng Y, Luan B, et al. Effects of capillary discharge current on the time of lasing onset of soft x-ray laser at low pressure [J]. ***Journal of Physics D -Applied Physics***, 2006, 39: 342-346.

[11] Zhang S, Wang Q, Zhu D, et al. Optical design for EUV lithography source collector[J]. ***Chinese Optics Letters***, 2011, 9(5): 052201.

[12] Colombant D, Tonon G. X-ray emission in laser-produced plasmas[J]. ***Journal of Applied Physics***, 1973, 44(8): 3524-3537.

[13] Klosner M, Silfvast W. Xenon-emission-spectra identification in the 5 -20 -nm spectral region in highly ionized xenon capillary-discharge plasmas[J]. ***J Opt Sci Am B***, 2000, 17(7): 1279-1290.