

13.5 nm 放电 Xe 等离子体极紫外光源

赵永蓬^{1*}, 徐强^{1,2}, 李琦¹, 王琪¹

¹ 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 150080;

² 东北林业大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要 搭建了极紫外光源实验装置, 获得了中心波长为 13.5 nm 的 Xe 等离子体极紫外的辐射光谱。测量了极紫外辐射的时间特性, 用多次箍缩理论解释了光脉冲的多峰结构。获得了主脉冲电流幅值、Xe 气流量、陶瓷管内径、等离子体长度、辅助气体等实验参数对极紫外辐射强度的影响规律。搭建了重复频率为 1 kHz 的 13.5 nm 极紫外光源样机, 介绍了样机的电源系统、放电系统、去碎屑系统和光收集系统的基本情况, 并给出了光源样机的调试结果。

关键词 X 射线光学; 极紫外光源; 放电等离子体; Xe; 极紫外光刻

中图分类号 O434.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1100001

13.5 nm Extreme Ultraviolet Light Source Based on Discharge Produced Xe Plasma

Zhao Yongpeng^{1*}, Xu Qiang^{1,2}, Li Qi¹, Wang Qi¹

¹ National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

² College of Science, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China

Abstract The experimental setup of an extreme ultraviolet (EUV) light source is built. The EUV radiation spectrum with a central wavelength of 13.5 nm from the Xe plasma is obtained and the temporal characteristics are characterized. The multi-peak structure of a light pulse is clarified by the multiple pinch theory. The influence laws of the experimental parameters such as the current amplitude of main pulse, Xe flow rate, inner diameter of ceramic tube, plasma length, and auxiliary gas on EUV radiation intensity are obtained. In addition, a prototype of 13.5 nm EUV light source with a repetition rate of 1 kHz is built and its power supply system, discharge system, debris mitigation tool and collector system are described. The test results about the prototype are also given.

Key words X-ray optics; EUV light source; discharge produced plasma; Xe; EUV lithography

OCIS codes 340.7480; 230.6080; 350.5400

1 引 言

目前, 极大规模集成电路芯片的工业生产主要采用 193 nm 激光光刻技术, 其刻线的最小尺寸已小于 16 nm, 已经接近理论极限。为了进一步减小刻线的最小尺寸以提高芯片的集成度, 下一代光刻采用波长更短的曝光光源。所有固体材料对波长短于 100 nm 的光都有强烈的吸收, 故下一代光刻机需要采用反射式光学系统。Mo/Si 多层膜反射镜对 13.5 nm 附近光的反射率最高(接近 70%^[1]), 因此

下一代光刻机采用波长 13.5 nm 附近 0.27 nm 带宽的极紫外荧光光源, 该技术被称为极紫外光刻技术。带宽 0.27 nm 为中心波长 13.5 nm 的 2%, 因此称其为“13.5 nm(2%带宽)”。Mo/Si 多层膜反射镜的反射率通常小于 70%, 反射过程中 13.5 nm 光的能量损失严重, 因此极紫外光刻机对光源的功率要求很高。

极紫外光刻机的光源主要采用激光辅助放电等离子体(LDP)或激光等离子体(LPP)中高价 Sn 离子辐射的 13.5 nm 荧光。在极紫外光刻技术的发展

收稿日期: 2018-05-28; 修回日期: 2018-06-23; 录用日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60838005)、国家科技 02 重大专项子课题(2008ZX02501-001)

* E-mail: zhaoy3@hit.edu.cn

过程中,极紫外光源的输出功率较低,曾长期是极紫外光刻机不能实现大规模工业生产的主要原因之一。为了达到工业上每小时 100 片的产能,要求极紫外光刻光源在中间焦点(IF 点)处的功率大于 200 W^[2]。在国际上处于领先地位的荷兰阿斯麦(ASML)公司已经推出了两代极紫外光刻机样机。第一代光刻样机 NXE3100 主要采用 LDP 极紫外光源,最初其光源 IF 点的功率只有 4~5 W^[3];第二代光刻样机 NXE3300 主要采用 LPP 极紫外光源,其光源 IF 点功率已经达到 210 W^[2],能够满足工业生产的要求。

产生 13.5 nm 辐射除了采用高价 Sn 离子的能级跃迁以外,也可以采用 Xe¹⁰⁺ 离子的能级跃迁。采用高价 Sn 离子时能量转换效率高,故需要高功率光源的极紫外光刻机一般采用 Sn 等离子体光源。但 Sn 常温下为固体,需要采用预脉冲激光将 Sn 气化,然后在主脉冲电流或主脉冲激光的作用下产生放电等离子体或 LPP,其装置相对复杂,造价昂贵。而 Xe 在常温下为气体,可以直接对其放电产生等离子体,其光源结构简单、造价低,更适合用作极紫外光学系统、掩模版、光刻胶等系统检测的中小功率光源^[4]。

Klosner 等^[5]报道了利用放电 Xe 等离子体产生极紫外辐射的研究,获得了重复频率为 100 Hz、13.5 nm 附近 0.3 nm 带宽内平均功率为 1.4 W 的输出^[6]。Götze 等^[7]通过多甲醛管放电烧熔管壁获得了 O 离子的 13.5 nm 辐射光输出,理论上可以作为极紫外光刻光源。Mohanty 等^[8]通过 Al₂O₃ 陶瓷管充入 Xe 气放电测量了 Xe 等离子体半径和 13.5 nm 辐射在时间上的变化。Teramoto 等^[9]通过内径为 2.3 mm 的 SiC 管放电获得了 Xe 等离子体,13.5 nm (2% 带宽)辐射的单位立体角最大辐射能量为 8 mJ。Song 等^[10]研究了不同电流上升沿对 Xe 等离子体 13.5 nm 辐射的影响,结果表明快变的电流能够提高 13.5 nm 辐射的光功率和稳定性。Nowakowska-Langier 等^[11]通过直径为 1 mm、长度为 8 mm 的氧化铝陶瓷管放电产生的 Xe 等离子体获得了 12~63 nm 的辐射。

在理论和实验研究的基础上,国际上还开展了放电 Xe 等离子体极紫外光源的商业样机研制。XTREME 技术公司于 2003 年研制出了世界上第一台放电 Xe 等离子体极紫外光源商业样机,型号为 XTS 13-35^[12-13]。该样机一般工作在重复频率为 1 kHz 的状态下,在 13.5 nm(2% 带宽)2 π 立体角内

的输出功率为 35 W,按 10% 的收集效率计算,IF 点功率可达 3.5 W^[12]。后续 XTREME 技术公司在提高收集镜的寿命和改进去碎屑装置方面进行了相应的研究^[13]。Energetiq Technology 公司采用 Xe 介质的 Z 箍缩无电极放电方式,建造了极紫外光源商业样机,型号为 EQ-10,在 13.5 nm(2% 带宽)2 π 立体角内的输出功率超过 10 W^[14]。

基于 Sn 等离子体的极紫外光刻光源取得了重要的进展,并已经能够满足光刻机工业生产的要求。而基于 Xe 介质的放电等离子体极紫外光源虽然也得到了发展,但其 2 π 立体角内的输出功率仍限于几十瓦。基于 Xe 等离子体的极紫外光源结构简单、造价低,因此在掩模检测等对光源功率要求较低的情形下得到了较好的应用^[12,14]。

本课题组一直在从事通过毛细管放电 Z 箍缩 Ar 等离子体产生软 X 射线激光的研究工作。在该研究工作的基础上,自 2008 年起开展了基于放电 Xe 等离子体的用于光学系统和掩模等检测的中小功率极紫外光源的研究。搭建了放电 Xe 等离子体极紫外光源实验装置,对 13.5 nm(2% 带宽)辐射进行了深入的理论和实验研究,获得了初始等离子体参数和放电参数对 13.5 nm 辐射的影响规律。在此基础上,建造了由重复频率为 1 kHz 的 13.5 nm 极紫外光源、去碎屑系统和极紫外光收集系统组成的样机。本文对本课题组在放电 Xe 等离子体极紫外光源方面取得的进展进行了全面的描述。

2 放电 Xe 等离子体极紫外光源的实验

放电等离子体极紫外光源通过 Z 箍缩过程获得高价离子组成的高温高密度的等离子体,通过高电压对介质放电产生陡前沿大电流。当变化率很大的大电流流过等离子体时,会产生强的环绕等离子体的磁场;该磁场与等离子体相互作用,产生指向轴心的洛伦兹力;在该洛伦兹力的作用下等离子体向轴心压缩,该过程称为 Z 箍缩。在等离子体 Z 箍缩的过程中,磁能转换成粒子的动能,粒子间相互碰撞,剥离原子的外层电子,形成高价离子组成的高温高密度等离子体。最终高价离子通过能级跃迁实现极紫外光的自发辐射。为了对等离子体进行有效箍缩,一般要求放电电流的脉宽为几百纳秒,电流幅值为几千安至几十千安,因此在建造放电电源时要考虑高电压大电流电脉冲的时间压缩。

2.1 实验装置

实验中通过放电产生 Xe 等离子体,利用 Xe¹⁰⁺

离子的能级跃迁获得光刻技术中所需的 13.5 nm 极紫外辐射,实验装置如图 1 所示。实验装置主要由预脉冲和主脉冲电源、放电室、真空室、充配气系统和探测器等组成。实验时首先调节气体的流量,在放电室中充入适量的初始气体,然后预脉冲放电形成初始的等离子体并流入 Al₂O₃陶瓷管中。经过适当的预-主脉冲延时,主脉冲电流流过陶瓷管中的初始等离子体,并对等离子体进行 Z 箍缩,最终形成高温高密度的 Xe 等离子体辐射极紫外光。在极紫

外光的测量方面,主要利用光电探测器测量 13.5 nm (2%带宽)的时间特性,利用光谱仪测量极紫外光谱。自制的极紫外光电探测器由 Mo/Si 多层膜反射镜、SiN 膜和快响应 X 射线二极管(IRD 公司,美国,型号为 AXUV20HS1BNC,上升沿为 1 ns)组成^[15],用来测量中心波长为 13.5 nm(2%带宽)的辐射光信号随时间的变化。极紫外掠入射谱仪(Mcpherson 公司,美国,型号为 248/310G)用于测量 Xe 等离子体辐射的极紫外光谱。

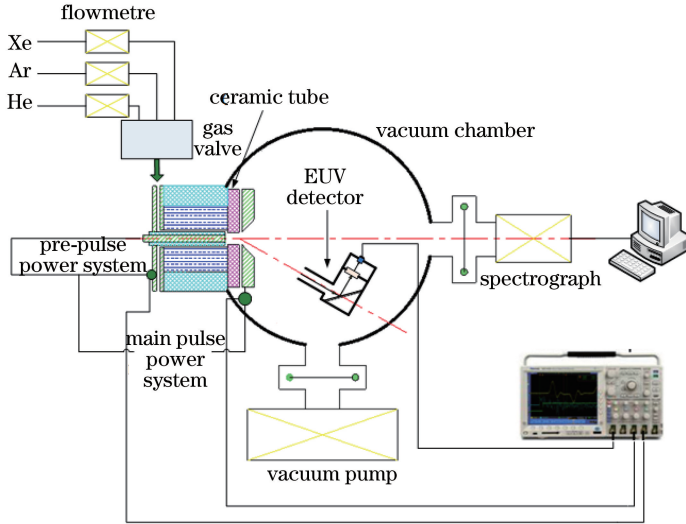


图 1 放电 Xe 等离子体极紫外光源的实验装置结构

Fig. 1 Structural diagram of experimental setup of EUV light source based on discharge produced Xe plasma

实验中采用预脉冲技术在陶瓷管中获得初始的等离子体。预脉冲的电压幅值为 6~8 kV(可调),电流幅值为 10~50 A(可调),脉宽为 3~10 μs(可调),预-主脉冲延时为 1~20 μs(可调)。为了实现等离子体的有效箍缩,需要高幅值陡前沿的主脉冲电流波

形,以获得足够大的电流变化率。为此,主脉冲电源采用了三级磁脉冲压缩技术,其电路图如图 2 所示,典型的主脉冲电流和电压波形如图 3 所示。主脉冲的电压幅值为 15~35 kV(可调),电流幅值为 15~40 kA(可调),电流脉宽为 110~500 ns(可调)。

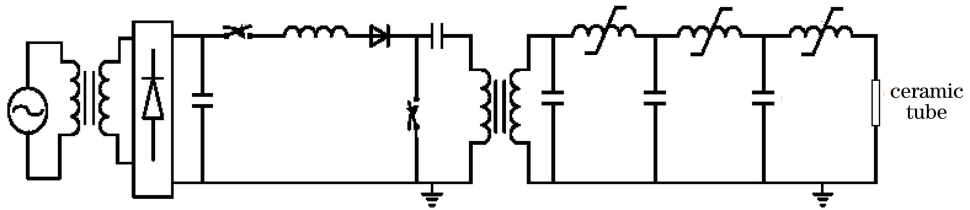


图 2 主脉冲电源电路图

Fig. 2 Circuit diagram of main pulse power supply

2.2 极紫外光谱和 13.5 nm 辐射的时间特性

图 4 所示分别为主脉冲电流为 30 kA、纯 He 流量为 2 cm³/min 和纯 Xe 流量为 0.7 cm³/min 时等离子体辐射的极紫外光谱。可以看出,在 10~18 nm 的波长范围内,He 等离子体辐射的谱线较少,而 Xe 等离子体的辐射光谱很丰富,主要来源于 Xe⁷⁺-Xe¹¹⁺ 离子 4d-5p、4d-4f 及 4p-4d 能级的跃迁。

16.17 nm 和 16.53 nm 的谱线来源于 Xe⁸⁺ 离子的 4d-5p 跃迁;10.5 nm 和 12 nm 的谱线来源于 Xe⁹⁺-Xe¹¹⁺ 离子的 4d-4f 及 4p-4d 跃迁;15 nm 附近的谱线来源于 Xe⁹⁺ 离子 4d-5p 的跃迁;12.2~12.8 nm 的谱线来源于 Xe¹¹⁺ 离子的 4d-5p 跃迁;13.5 nm 附近的谱线来源于 Xe¹⁰⁺ 离子的 4d-5p 跃迁。极紫外光刻机的照明、掩模和投影光学系统均采用反射中

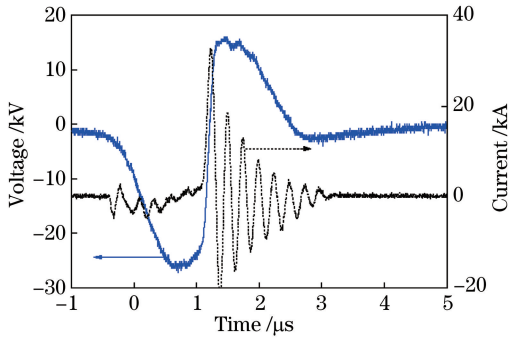


图3 典型的主脉冲电压和电流波形

Fig. 3 Typical voltage and current waveforms of main pulse

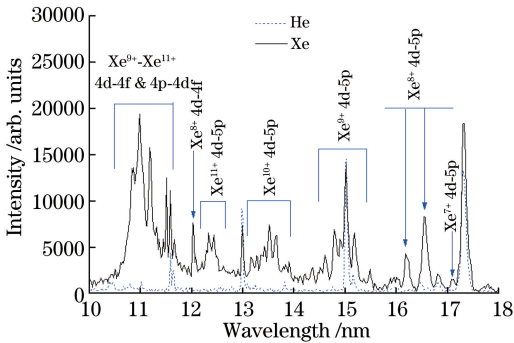


图4 Xe 和 He 等离子体辐射的极紫外光谱

Fig. 4 EUV spectra emitted from Xe and He plasma

心波长位于 13.5 nm 的 Mo/Si 多层膜反射镜,其他波长光的反射率很小,最终曝光时只剩下中心波长为 13.5 nm(2%带宽)的光。因此图 4 中 Xe^{10+} 离子辐射的中心波长为 13.5 nm、2%带宽内的光为极紫外光刻所需的光源。

利用自制的极紫外光电探测器^[15]测量了 13.5 nm(2%带宽)辐射光信号随时间的变化,典型结果如图 5 所示,此时 Xe 气流量为 $0.7 \text{ cm}^3/\text{min}$,陶瓷管内径为 5 mm。可以看出,主脉冲电流的幅值为 28 kA,13.5 nm 辐射在 84,114,142 ns 附近存在三个峰值。对等离子体的 Z 箍缩过程进行了理论计算,所得的等离子体半径随时间的变化如图 6 所示。为了方便比较,在图 6 中同时给出了 13.5 nm 辐射光信号随时间的变化。可以看出,13.5 nm 辐射光信号三个峰值的产生时间与等离子体三次箍缩到最小直径的时间相对应。这表明等离子体存在三次箍缩过程,箍缩到最小半径时,等离子体的温度最高、密度最大,故此时的 13.5 nm 辐射最强。理论和实验结果表明,随着主脉冲电流的减小、气体流量的增大或陶瓷管内径的增大,等离子体 Z 箍缩的次数减少,实验测得的 13.5 nm 辐射信号的峰值个数也相应减少^[16]。产生 13.5 nm 辐射时等离子体可能存在多次箍缩过程的结论对深入理解等离子体的 Z

箍缩机理和获得更强的 13.5 nm 辐射具有重要的意义。

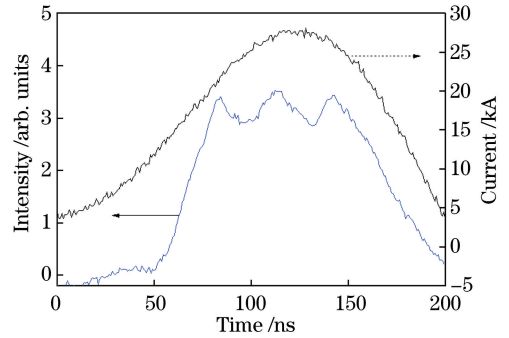


图5 主脉冲电流波形和 13.5 nm 辐射随时间的变化

Fig. 5 Current waveform of main pulse and 13.5 nm radiation versus time

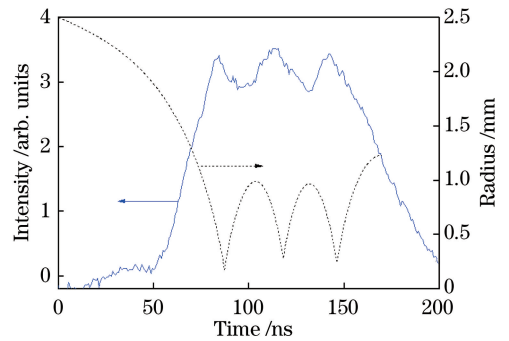


图6 13.5 nm 辐射和等离子体半径随时间的变化

Fig. 6 13.5 nm radiation and plasma radius versus time

2.3 预脉冲和主脉冲放电对 13.5 nm 辐射的影响

实验中采用了预-主脉冲放电技术,即在主脉冲到来前通过预脉冲放电产生初始等离子体(等离子体中主要含有 Xe^+ 、 Xe^{2+} 等低价离子)。在预脉冲电极间形成的初始等离子体被后续连续充入的 Xe 气吹入陶瓷管内部,陶瓷管内形成较均匀的初始等离子体。经过一定的延时后,主脉冲电压到达陶瓷管两端时,对管内的初始等离子体放电,形成主脉冲放电电流,获得 Xe 等离子体的 Z 箍缩过程。实验结果表明,在未采用预脉冲技术时,主脉冲直接对绝缘的 Xe 气放电,此时击穿所需的最小 Xe 气流量远高于最佳流量,且存在放电电流不稳定的问题。而采用预脉冲技术后,主脉冲电流的重复性更好,可以在最佳 Xe 气流量下获得强度更高且更稳定的 13.5 nm 极紫外辐射。

实验上研究了主脉冲电流对 13.5 nm 辐射强度的影响,实验结果如图 7 所示,此时 Xe 气流量为 $1.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。可以看出,主脉冲电流在 16~30 kA 范围内时,13.5 nm 强度随电流的增大而线性增大。电流为 30 kA 时的 13.5 nm 辐射强度约是电流为

16 kA 时的 2.7 倍。当主脉冲电流幅值增大时,可以产生更大的洛伦兹力,箍缩更高密度的 Xe 等离子体,增大箍缩到轴心时等离子体中 Xe^{10+} 离子的粒子数密度,有利于提高 13.5 nm 辐射的强度。但过大的电流会导致电源体积增大,对绝缘和散热的要求更高,增大了高重复频率工作时电源的设计难度。较大的电流也会更严重地烧蚀陶瓷管管壁和电极,产生更多的碎屑。同时,较大的电流会导致电极上热量沉积增多,在高重复频率工作时很难解决电极的散热问题。因此,在 1 kHz 重复频率的极紫外光源样机的设计和工作过程中,选择了适中的主脉冲电流幅值。

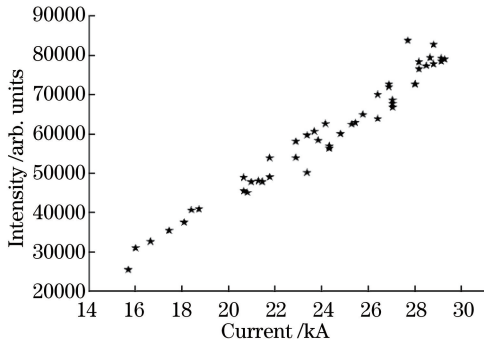


图 7 13.5 nm 辐射强度随主脉冲电流的变化
Fig. 7 13.5 nm radiation intensity versus current of main pulse

2.4 初始等离子体参数对 13.5 nm 辐射的影响

2.4.1 初始等离子体密度对 13.5 nm 辐射的影响

实验中通过改变 Xe 气的流量改变初始 Xe 等离子体的密度,从而改变等离子体的 Z 箍缩过程。Xe 气流量增大会导致 Xe 原子的初始密度增大,当预脉冲放电时,会形成密度更高的初始等离子体,增大 Z 箍缩时等离子体向外膨胀的热压,故 Z 箍缩过程变慢,压缩到轴心时的等离子体直径变大,影响压缩到轴心时等离子体的温度和密度。因此 Xe 气的流量会对 13.5 nm 辐射产生重要影响。图 8 所示为陶瓷管内径为 5 mm、主脉冲电流幅值为 30 kA 时,主脉冲单独放电和预-主脉冲联合放电时不同气体流量下 13.5 nm 辐射强度的变化情况。可以看出,当没有预脉冲时,主脉冲能够击穿气体的最小流量为 $0.7 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。当预-主脉冲联合放电时,由于预脉冲已经形成了初始等离子体,较小的气体流量也能获得 13.5 nm 输出。当气体流量为 $0.4 \text{ cm}^3/\text{min}$ 时,Z 箍缩到轴心时等离子体的状态最有利于产生 Xe^{10+} 离子,故辐射的 13.5 nm 荧光最强。当气体流量小于 $0.4 \text{ cm}^3/\text{min}$ 时,随着流量减小,初始气压减

小,等离子体向外膨胀的热压减小,Z 箍缩产生的等离子体的温度升高, Xe^{10+} 离子会进一步电离成 Xe^{11+} 离子,故 Xe^{10+} 离子的粒子数密度减小,13.5 nm 辐射强度减小。当气体流量大于 $0.4 \text{ cm}^3/\text{min}$ 时,随着流量增加,初始气压增大,等离子体向外膨胀的热压增大,Z 箍缩产生的等离子体的温度降低,此时 Xe^{8+} 或 Xe^{9+} 离子很难电离成 Xe^{10+} 离子,故 Xe^{10+} 离子的粒子数密度减小,13.5 nm 辐射强度减小。

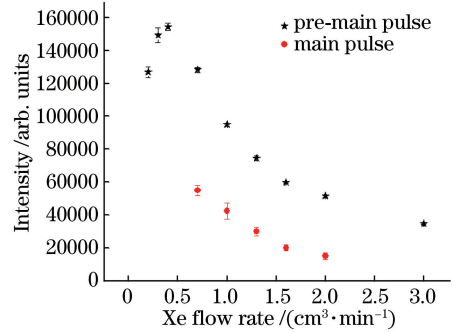


图 8 13.5 nm 辐射光强随 Xe 气流量的变化

Fig. 8 13.5 nm radiation intensity versus Xe flow rate

2.4.2 初始等离子体直径对 13.5 nm 辐射的影响

初始等离子体充满陶瓷毛细管,因此在实验中通过改变陶瓷管的内径改变初始 Xe 等离子体的直径。初始等离子体直径的增大会导致 Z 箍缩到轴心的距离的增大,增大 Z 箍缩的难度。然而陶瓷管内径增大会减小陶瓷管内表面的电流密度,减少管壁烧蚀,延长陶瓷管的使用寿命。增大陶瓷管内径还可以减少管壁烧蚀产生的碎屑,有利于延长收集镜的使用寿命。此外,陶瓷管内径的增大会减少管壁对大发散角 13.5 nm 辐射的遮挡,有利于输出 13.5 nm 辐射。因此实验中,在保证 Z 箍缩能够形成合适的等离子体状态的同时尽量增大陶瓷管的内径。

图 9 所示分别为 Xe 气流量为 $1.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、主脉冲电流幅值为 20 kA 时 3 mm 和 5 mm 内径陶瓷

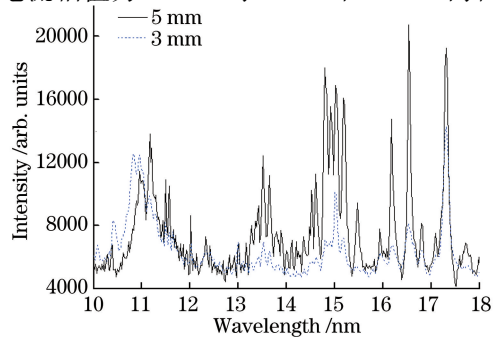


图 9 不同陶瓷管内径条件下的 Xe 等离子体辐射极紫外光谱
Fig. 9 EUV spectra emitted from Xe plasma under different ceramic tube diameters

管放电的极紫外光谱。可以看出,5 mm 内径陶瓷管放电产生的 13.5 nm 辐射强于 3 mm 内径陶瓷管的;使用 5 mm 内径陶瓷管时 14~18 nm 之间 Xe^{7+} - Xe^{9+} 离子的 4d-5p 跃迁辐射也强于 3 mm 内径陶瓷管的。与 5 mm 内径毛细管相比,采用 3 mm 内径的毛细管会导致等离子体 Z 箍缩到轴心的距离减小,Z 箍缩过程会更加剧烈,形成的等离子体中 Xe^{10+} 离子可能会过电离成 Xe^{11+} 离子,减小 13.5 nm 辐射的强度。故 5 mm 内径陶瓷管放电的 Z 箍缩过程更有利于 Xe^{7+} - Xe^{10+} 离子的产生,且有效地避免了 Xe^{10+} 离子的过电离,有利于增强 13.5 nm 辐射。此外,5 mm 内径陶瓷管具有减少碎屑、延长陶瓷管使用寿命和有利于大角度光输出的优点,在建造极紫外光源样机时主要选用了 5 mm 内径的陶瓷管。

2.4.3 等离子体长度对 13.5 nm 辐射的影响

Xe 气流量为 $0.7 \text{ cm}^3/\text{min}$,放电电流为 30 kA,等离子体长度分别为 3,6,9 mm 时 Xe 等离子体辐射的极紫外光谱如图 10 所示^[17]。可以看出,随着等离子体长度的增大,辐射光谱强度整体增大,这是由于等离子体长度增大会使各价态离子的粒子数增多。但较长的等离子体柱经光学收集系统聚焦后,焦点的光斑尺寸会较大,不利于光刻机中照明系统的设计,在实际使用时电极距离一般为 3~6 mm。

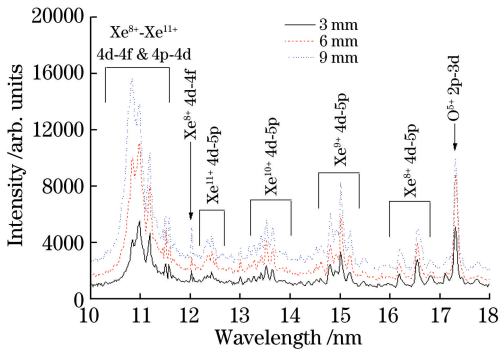


图 10 不同等离子体长度条件下的 Xe 等离子体辐射极紫外光谱

Fig. 10 EUV spectra emitted from Xe plasma with different plasma lengths

2.4.4 初始等离子体成分对 13.5 nm 辐射的影响

在 Xe 气中掺入不同比例的 He 气,研究了 Xe/He 混合等离子体辐射的极紫外光谱。陶瓷管内径为 3 mm、Xe 气流量为 $1.6 \text{ cm}^3/\text{min}$ 、主脉冲电流为 26 kA 时,纯 Xe 以及 He 与 Xe 的气体流量比分别为 2:1、6:1 和 12:1 时的光谱如图 11 所示。可以看出,He 气掺入时 10~14 nm 之间光谱强度明显增大。图

12 所示为 13.5 nm 辐射强度随 He、Xe 流量比的变化。可以看出,当 He 气和 Xe 气的流量比为 8:1 时,13.5 nm 辐射强度出现极值,此时光强约为纯 Xe 时的 2 倍。因此,实验中选用适当比例的 Xe 和 He 的混合气体,有利于提高 13.5 nm 辐射的强度^[18]。

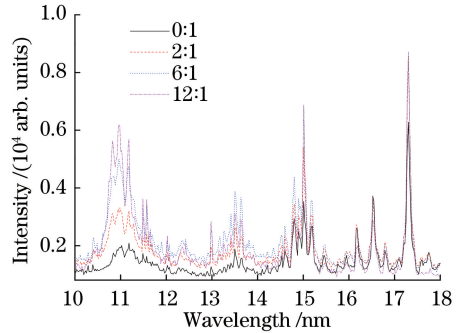


图 11 不同 He/Xe 流量比条件下的等离子体辐射光谱
Fig. 11 EUV spectra emitted from plasma under different He/Xe flow rate ratios

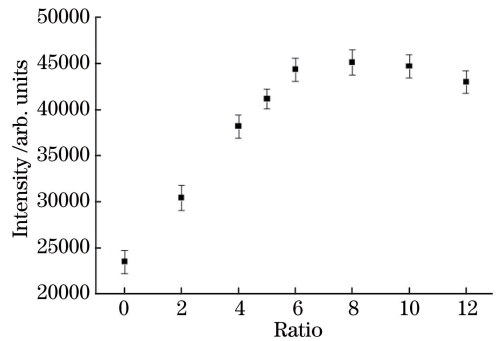


图 12 13.5 nm 辐射光强随 He、Xe 流量比的变化
Fig. 12 13.5 nm radiation intensity versus He/Xe flow rate ratio

在等离子体的 Z 箍缩过程中,初始压缩时 He 未完全电离,电子与 He 离子的碰撞使得 He 离子激发或电离,电子与 He 离子的碰撞主要为非弹性碰撞,此时电子温度会比纯 Xe 放电时的偏低。He 的第二电离能为 54 eV,仅与 Xe^{4+} 离子的电离能相当,因此在等离子体的 Z 箍缩过程中 He 将迅速电离为裸核。He 完全电离后,电子与 He 离子的碰撞仅为弹性碰撞,可以认为此时与纯 Xe 等离子体相比电子温度基本不变。He 完全电离时可以产生 2 个电子,因此掺入 He 气的主要作用是提高了箍缩过程中的电子密度,电子密度的增大导致更多的 Xe^{10+} 离子通过电子碰撞激发跃迁到 $4d^7 5p$ 能级,因而 $4d^7 5p$ 能级向 $4d^8$ 能级跃迁产生的 13.5 nm 辐射的强度增大。

除了在 Xe 气中掺入 He 以外,实验上还研究了 Xe 气中掺入 Ar 气对极紫外光谱的影响^[18-19]。图

13所示为陶瓷管内径为3 mm、Xe气流量为2.0 cm³/min、Ar气流量为6.0 cm³/min、主脉冲电流为30 kA时纯Xe和Xe/Ar混合气体放电光谱的比较。可以看出,Ar气的掺入对13.5 nm附近辐射光谱的影响不大。但实验中发现,Ar气的掺入有利于气体的顺利击穿,增强了放电的稳定性,因此Xe/He/Ar混合气体是比较理想的放电介质。

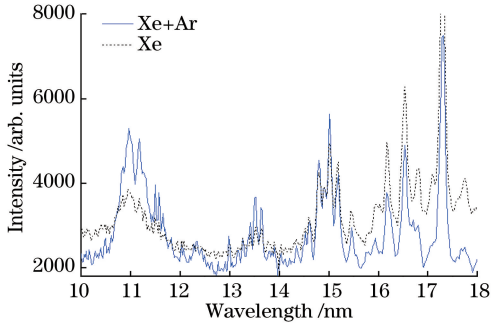


图 13 Xe/Ar 混合气体和纯 Xe 条件下的等离子体辐射光谱
Fig. 13 EUV spectra emitted from plasma under Xe/Ar mixed gas and pure Xe conditions

为了获得最强的Xe¹⁰⁺离子的13.5 nm辐射输出,需要使初始等离子体Z箍缩到最小半径时具有最佳的电子温度和密度。当等离子体偏离最佳状态时,不利于形成Xe¹⁰⁺离子。过低的电子温度会

导致Xe⁸⁺离子或Xe⁹⁺离子不能有效地电离成Xe¹⁰⁺离子,而过高的电子温度会导致Xe¹⁰⁺离子电离成Xe¹¹⁺离子。主脉冲电流、初始等离子体密度和初始等离子体直径都会影响等离子体的Z箍缩过程,进而影响产生13.5 nm辐射时的等离子体状态。主脉冲电流越大、初始等离子体密度越小、初始等离子体直径越小,Z箍缩过程越剧烈,形成的等离子体温度越高。因此通过适当选择主脉冲电流、初始等离子体密度和初始等离子体直径,可以有效地控制Z箍缩过程,使箍缩到最小半径时等离子体处于最佳状态,进而获得最强的13.5 nm辐射。此外,通过在Xe中掺入辅助气入He的方式适当增大等离子体中的电子密度,有利于提高13.5 nm辐射的强度。

3 放电Xe等离子体13.5 nm极紫外光源样机的研制

在对主脉冲电流、Xe气流量、陶瓷管内径、等离子体长度、混合气体放电介质等深入研究的基础上,设计并建造了重复频率为1 kHz的放电Xe等离子体13.5 nm极紫外光源样机^[20],其结构如图14所示。光源样机包括电源系统、放电系统、去碎屑系统和光收集系统。

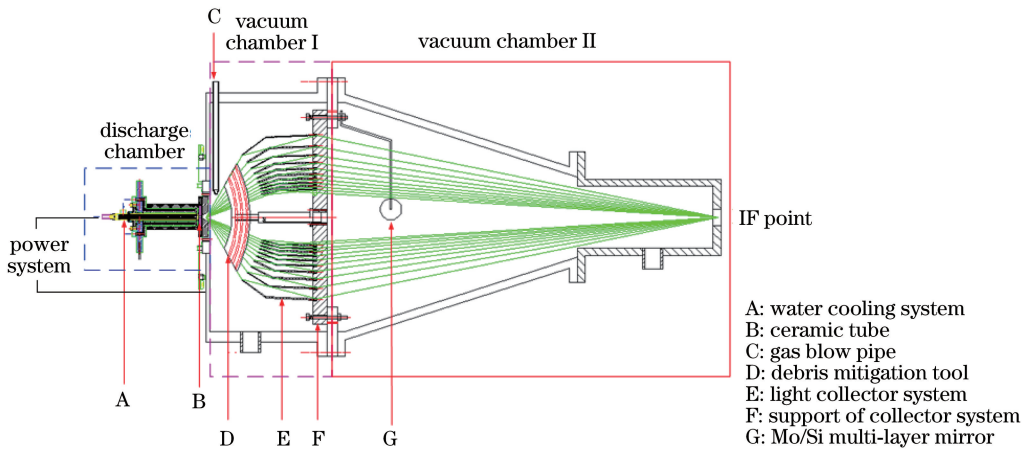


图 14 放电Xe等离子体极紫外光源样机的结构

Fig. 14 Structural diagram of EUV light source prototype based on discharge produced Xe plasma

3.1 电源及放电系统

采用预-主脉冲联合放电方式能够提高光源的稳定性,因此1 kHz光源采用预脉冲与主脉冲联合放电的工作方式。综合考虑主脉冲电流对13.5 nm辐射的影响规律和主脉冲电源的建造难度,设计主脉冲电源参数为:电压10~20 kV、电流10~20 kA、脉宽120 ns、重复频率1~1000 Hz可调。为了提高预脉冲击穿气体的稳定性,适当增大了预

脉冲电压的幅值,预脉冲电源的参数为:电压20~25 kV、电流15~25 A、脉宽1~20 μs可调、预-主脉冲延时1~20 μs可调、重复频率1~1000 Hz可调。

极紫外光源样机的放电室的结构与图1所示的结构基本相同^[21],如图14所示。根据关于陶瓷管内径和长度的实验结果,陶瓷管长度选择6 mm、内径选择5 mm。为了减少重复频率下的热能沉积,放电电极配有循环水冷却装置^[22]。

3.2 去碎屑系统

在真空室内放置硅片测量了碎屑的产生情况, Xe 气介质放电 1500 次后测量硅片上的沉淀物, 发现在硅片上的沉积物主要由 O 和 Al 组成, 来源于陶瓷管(Al_2O_3)和电极的烧蚀。为了保证光收集系统的镜面不受污染, 设计了去碎屑系统。去碎屑系统采用喷气和多层金属箔片技术相结合的方式^[23]。喷气的作用是改变出射碎屑的轨迹, 使其附着到金属箔片上, 避免对光学系统的污染。设计和加工的去碎屑系统的多层金属箔片实物如图 15 所示, 由 10 片金属箔片组成, 箔片按照图 14 中的光线传播方向设计, 尽量减少了其对光源传输到收集镜的极紫外光的遮挡。

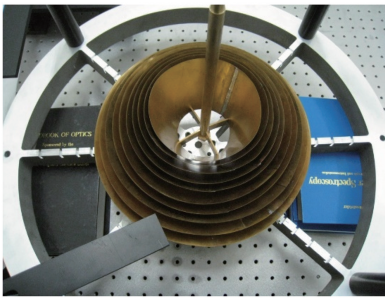


图 15 多层金属箔片去碎屑系统的实物
Fig. 15 Picture of debris mitigation tool of multilayer metal foil

3.3 极紫外光收集系统

极紫外光收集系统采用 10 层 Wolter-I 型反射镜结构^[24], 每一片镜片包括一个椭球面和一个双曲面, 其结构和相应光收集情况如图 16 所示。极紫外光以掠入射的方式照射到反射镜上, 以增大镜面的反射率。根据国内超精密加工水平, 提出了一套以车削加工为核心的收集镜加工工艺。直接以铝合金 LY12 作为收集镜基底, 镍磷合金为反射面, 具体工艺流程分为收集镜基底粗车^[25]、收集镜基底数控车削与尺寸稳定化处理^[25]、收集镜内表面镀镍磷厚膜^[26]、收集镜基底精车^[27]、手工抛光和面型检测等步骤。图 17 所示为精车和抛光后的收集镜, 精车后未经抛光前反射面的粗糙度为 7 nm, 手工抛光后相同位置的表面粗糙度为 4.1 nm。

3.4 极紫外光源样机的集成与测试

在完成了各关键部件性能测试后, 开展了重复频率为 1 kHz 的放电 Xe 等离子体极紫外光源样机的系统集成, 图 18 所示为样机集成后的实物图。在该样机上开展了 13.5 nm 辐射性能的测试。

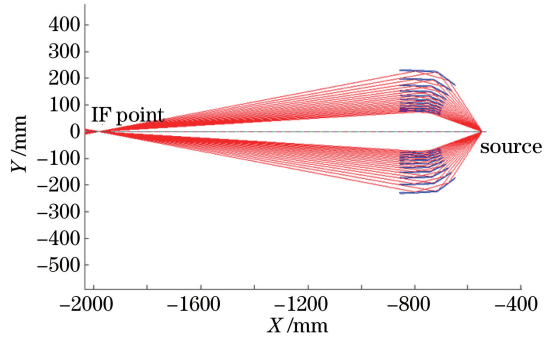


图 16 10 层收集镜系统的光路图

Fig. 16 Diagram of optical path for 10 layer collector system

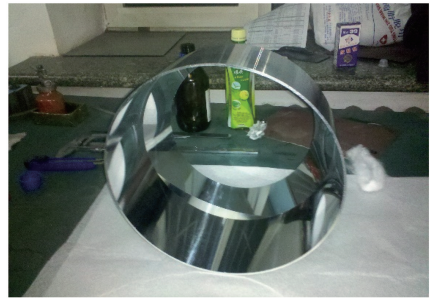


图 17 精车和手工抛光后的收集镜实物

Fig. 17 Picture of collector after finish turning and polishing by hand

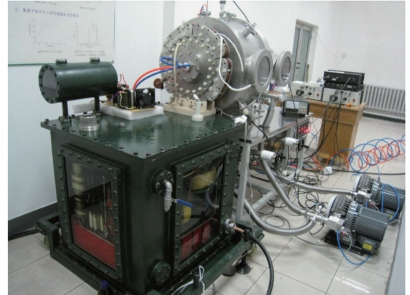


图 18 重复频率为 1 kHz 的放电 Xe 等离子体极紫外光源样机的实物

Fig. 18 Picture of EUV light source prototype based on discharge produced Xe plasma at repetition frequency of 1 kHz

主脉冲电流为 15 kA、Xe 气流量为 $0.7 \text{ cm}^3/\text{min}$ 时, 样机 Xe 等离子体辐射的极紫外光谱如图 19 所示, 与图 4 所示的光谱形状非常相近, 获得了 Xe^{10+} 离子 13.5 nm 附近的辐射, 证明了样机的电源系统、放电系统设计的正确性。测量了不同重复频率下预-主脉冲放电的稳定性, 分析了 Xe 气流量、He 气与 Xe 气的比例对 13.5 nm 辐射的影响, 确定了样机的最佳工作参数。在 Xe 气流量为 $0.7 \text{ cm}^3/\text{min}$ 的条件下, 采用极紫外能量计 (00M-EM-001, Bruker Advanced Supercon GmbH 公司, 德国), 测量了单脉冲条件下 13.5 nm 辐射光信号,

如图 20 所示。根据能量计与光源的距离以及能量计的相关参数,计算可知此时 2π 立体角的单脉冲能量为 1.28 mJ。在重复频率为 1 kHz 时使用 Xe 气与 He 气的混合气体,测得 2π 立体角内 13.5 nm 辐射光功率约为 1.4 W,稳定性为 $\pm 26\%$,经估算此时 IF 点的功率约为 100 mW。目前该样机还存在高重复频率时主脉冲电流下降、击穿不稳定、电子元件寿命较短等问题,解决这些问题会使 13.5 nm 极紫外光的功率得到进一步的提升。

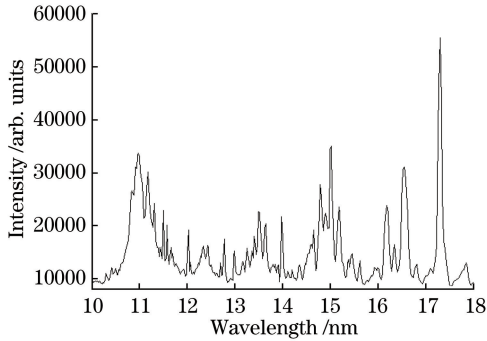


图 19 放电 Xe 等离子体极紫外辐射光谱
Fig. 19 EUV spectrum emitted from discharge produced Xe plasma

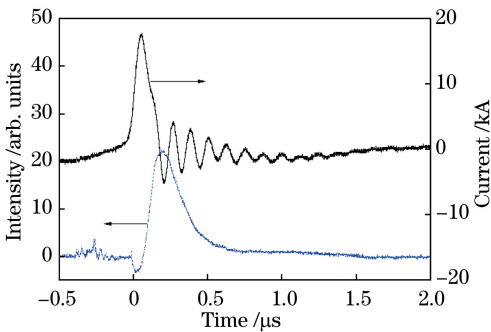


图 20 13.5 nm 辐射光脉冲和主脉冲电流波形
Fig. 20 13.5 nm radiation light pulse and current waveform of main pulse

4 结 论

搭建了放电 Xe 等离子体极紫外光源实验装置,获得了中心波长位于 13.5 nm 的辐射,并分析其来源于 Xe^{10+} 离子 4d-5p 的跃迁。测量了 13.5 nm (2%带宽)辐射光的时间特性,观察到辐射光脉冲存在 3 个峰值,并用多次箍缩理论的计算结果解释了实验结果。实验中采用了预-主脉冲联合放电技术。研究表明,采用预脉冲技术有利于在较低的流量下击穿 Xe 气,并能提高主脉冲电流和 13.5 nm 辐射的稳定性。开展了实验参数对 13.5 nm 辐射强度影响的研究,实验结果表明,随着主脉冲电流的增

大,13.5 nm 辐射的强度线性增大;存在最佳的气体流量,对应最强的 13.5 nm 辐射;适当增大陶瓷管内径和等离子体长度、在 Xe 气中适当掺入 He 气,有利于提高 13.5 nm 辐射的强度。根据上述规律对实验参数进行选择,建造了重复频率为 1 kHz 的 13.5 nm 极紫外光源样机。样机中采用喷气和多层金属箔片相结合的方式去除了放电时产生的碎屑,以减少对光收集系统的污染。极紫外光收集系统采用 Wolter-I 型反射镜结构,以掠入射方式将陶瓷管内发出的 13.5 nm 极紫外辐射聚焦到 IF 点。对极紫外光源样机进行了系统集成和调试,获得了中心波长位于 13.5 nm 的极紫外辐射。在重复频率为 1 kHz 时, 2π 立体角内 13.5 nm 辐射光功率约为 1.4 W,经估算此时 IF 点的功率约为 100 mW。该极紫外光源样机的研制为建造更高功率的极紫外光源提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Kaiser N, Yulin S, Perske M, *et al.* High performance EUV multilayer optics[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7101: 71010Z.
- [2] Fomenkov I, Brandt D, Ershov A, *et al.* Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: Technology, performance, and power scaling[J]. Advanced Optical Technologies, 2017, 6(3/4): 173-186.
- [3] Hermans J V, Laidler D, Foubert P, *et al.* Progress in EUV lithography towards manufacturing from an exposure tool perspective[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8322: 832202.
- [4] Vieker J, Bergmann K. Influence of the electrode wear on the EUV generation of a discharge based extreme ultraviolet light source[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(34): 345601.
- [5] Klosner M A, Silfvast W T. Intense xenon capillary discharge extreme-ultraviolet source in the 10-16-nm-wavelength region[J]. Optics Letters, 1998, 23(20): 1609-1611.
- [6] Silfvast W T, Klosner M, Shimkaveg G, *et al.* High-power plasma discharge source at 13.5 nm and 11.4 nm for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3676: 272-275.
- [7] Götze S, Ellwi S, Andreić Ž, *et al.* Time resolved diagnostics of plasmas in polyacetal ablative capillary discharges[J]. Physics Letters A, 2002, 299(5/6): 571-576.
- [8] Mohanty S R, Robert E, Dussart R, *et al.* A novel fast capillary discharge system emitting intense EUV radiation possible source for EUV lithography[J].

- Microelectronic Engineering, 2003, 65(1/2): 47-59.
- [9] Teramoto Y, Sato H, Bessho K, *et al.* Development of Xe-filled capillary discharge extreme ultraviolet radiation source for semiconductor lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 767-775.
- [10] 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(3): 322-327.
- [11] Nowakowska-Langier K, Jakubowski L, Baronova E O, *et al.* Observations of extreme ultraviolet emission from plasma produced by capillary discharges [J]. The European Physical Journal D, 2009, 54(2): 377-382.
- [12] Stamm U. Extreme ultraviolet light sources for use in semiconductor lithography-state of the art and future development[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(23): 3244-3253.
- [13] Stamm U, Kleinschmidt J, Bolshukhin D, *et al.* Development status of EUV sources for use in Beta-tools and high-volume chip manufacturing tools [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6151: 61510O.
- [14] Partlow M J, Besen M M, Blackborow P A, *et al.* Extreme-ultraviolet light source development to enable pre-production mask inspection[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012, 11(2): 021105.
- [15] Zhao Y P, Xu Q, Wang Q. Detection system for the state of Xe^{10+} ions in EUV-lithograph light source: CN201210164154.5[P]. 2012-05-24.
赵永蓬, 徐强, 王骐. 极紫外光刻光源 Xe^{10+} 离子状态的检测系统: CN201210164154.5[P]. 2012-05-24.
- [16] Xu Q, Zhao Y P, Xie Y, *et al.* Effect of current on multiple pinches of Xe plasma in capillary discharge[J]. The European Physical Journal D, 2014, 68(3): 40.
- [17] Zhao Y P, Xu Q, Li Q, *et al.* Influence of plasma size on discharge extreme ultraviolet source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(10): 2631-2635.
赵永蓬, 徐强, 李琦, 等. 等离子体尺寸对放电极紫外光源影响 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(10): 2631-2635.
- [18] Zhao Y P, Xu Q, Wang Q. A kind of medium and application system used in EUV-lithograph light source of discharge produced plasma: CN201210026159.1[P]. 2012-02-07.
赵永蓬, 徐强, 王骐. 一种用于放电等离子体极紫外光刻光源的介质及其应用系统: CN201210026159.1 [P]. 2012-02-07.
- [19] Xu Q, Zhao Y P, Liu Y, *et al.* Effect of He/Ne/Ar on EUV emission and Xe plasma pumped by capillary discharge [J]. The European Physical Journal D, 2013, 67(6): 125.
- [20] Wang Q, Xu Q, Zhao Y P. Capillary-discharge-pumped EUV source system with Xe for inspection: CN201510084923.4[P]. 2015-02-16.
王骐, 徐强, 赵永蓬. Xe 介质毛细管放电检测用极紫外光源系统: CN201510084923.4[P]. 2015-02-16.
- [21] Xu Q, Zhao Y P, Wang Q. A kind of capillary-discharge electrode used in light source of EUV lithograph: CN201610378862.7[P]. 2016-05-31.
徐强, 赵永蓬, 王骐. 一种用于毛细管极紫外光刻光源的放电电极: CN201610378862.7[P]. 2016-05-31.
- [22] Wang Q, Xu Q, Zhao Y P. Discharge chamber of capillary-discharge-pumped EUV light source with Xe for inspection: CN201510084937.6[P]. 2015-02-16.
王骐, 徐强, 赵永蓬. Xe 介质毛细管放电检测用极紫外光源的放电室: CN201510084937.6[P]. 2015-02-16.
- [23] Zhao Y P, Xu Q, Wang Q. Debris mitigation tool in the light path of EUV-lithograph light source pumped by capillary discharge with Z pinch: CN201620569387.7[P]. 2016-06-13.
赵永蓬, 徐强, 王骐. 毛细管放电 Z 箍缩极紫外光刻光源光路中杂质过滤装置: CN201620569387.7[P]. 2016-06-13.
- [24] Zhu D Y, Zhao Y P, Xu Q, *et al.* Collector of EUV-lithograph light source pumped by capillary discharge with Z pinch: CN201610444231.0[P]. 2016-06-20.
祝东远, 赵永蓬, 徐强, 等. 毛细管放电 Z 箍缩极紫外光刻光源的收集系统: CN201610444231.0[P]. 2016-06-20.
- [25] Zhao Y P, Xu Q, Wang Q. Directly rough turning method of light collector in EUV-lithograph light source: CN201310438498.5[P]. 2013-09-24.
赵永蓬, 徐强, 王骐. 极紫外光刻光源中光学收集镜直接车削加工粗加工方法: CN201310438498.5[P]. 2013-09-24.
- [26] Wang D L, Wang Q, Xu Q, *et al.* Method to increase the layer thickness of chemical plating Ni-P alloy with electrical pulse: CN201410062341.1[P]. 2014-02-24.
王殿龙, 王骐, 徐强, 等. 电脉冲提高化学镀镍磷合金层厚度的方法: CN201410062341.1[P]. 2014-02-24.
- [27] Xu Q, Zhao Y P, Wang Q. Directly precision turning method of light collector in EUV-lithograph light source: CN201310435460.2[P]. 2013-09-23.
徐强, 赵永蓬, 王骐. 极紫外光刻光源中光学收集镜直接车削加工精加工方法: CN201310435460.2[P]. 2013-09-23.