

提高毛细管放电类氩氦 46.9 nm 软 X 射线激光强度的研究

谢 耀¹, 赵永蓬², 王 骐²

- (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. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为了提高毛细管放电类氩氦 46.9 nm 软 X 射线激光的强度, 研究了工作介质中气体的掺杂对激光强度的影响。研究表明, 在纯 Ar 中掺入适量的 He 显著地提高了激光的输出强度。通过对比在 Ar 中掺入 Ne、N₂ 以及 Kr 等其他气体的实验, 系统地分析了 He 的掺入对等离子温度的影响, 找到了在特定工作气压下最佳的掺杂比, 有利于进一步提高毛细管放电 46.9 nm 软 X 射线激光的强度。在放电等离子体极紫外光刻(EUVL)光源研究过程中, 也采用了在 Xe 中掺入适量 He 的方式以提高 13.5 nm 的输出强度。

关键词: 毛细管; 软 X 射线激光; XRD; Rowland 谱仪; 类氩氦

中图分类号: TN248.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2036-05

Research of enhancing the output of capillary discharge-pumped Ne-like Ar 46.9 nm soft X-ray laser

Xie Yao¹, Zhao Yongpeng², Wang Qi²

- (1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Institute of Optical-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The observation of the capillary discharge-pumped Ne-like Ar 46.9 nm soft X-ray laser output was reported under the condition of pure Ar and gaseous mixture of Ar-He, Ar-Ne, Ar-N₂ and Ar-Kr. Mixing Ar with an appropriate quantity of He, the laser output was enhanced evidently, and there was an optimum ratio of He in the gaseous mixture of Ar-He, which could be the best for laser output. The experimental results of Ar-Ne, Ar-N₂ and Ar-Kr mixture show that Ne, N₂ and Kr decrease the laser output. The source research of discharged produced plasma in extreme ultraviolet lithography also mixes an appropriate quantity of He, in order to enhance 13.5 nm.

Key words: capillary; soft X-ray laser; XRD; Rowland spectrograph; Ne-like Ar

收稿日期: 2012-12-17; 修订日期: 2013-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(61078034)

作者简介: 谢耀(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事 EUV 光刻曝光光学系统装调方面的研究。Email: xie_yao3@ 163.com

0 引言

软 X 射线激光因其瞬间亮度高、波长短、脉冲持续时间短等特点,可以应用于超大规模集成电路光刻、等离子体诊断、X 光显微术和全息术等需要的时间和空间分辨的微观快过程研究领域^[1-2],因而受到了越来越多的关注,实现紧凑、高效、低激发阈值的台式的软 X 射线激光器成为了各国研究的重点,其中毛细管放电泵浦软 X 射线激光器是一种被认为可以实现应用的桌式的软 X 射线激光器。毛细管放电是指在直径为几毫米,长度为几厘米至几十厘米的陶瓷材料为主的毛细管两端加载上升沿较快的高电压脉冲,在毛细管中形成等离子体通道,通过 Z 箍缩效应,产生形成积聚于毛细管中心的高温、高密度的等离子体区,最终形成相应能级的粒子数反转和受激发射,毛细管特有的几何结构使得在适当的预脉冲(对增益介质进行预电离)作用下,快放电产生的细长等离子体具有较好的稳定性和对称性,能够获得很长的增益区。1994 年, Rocca 小组^[3]成功演示了毛细管放电泵浦的软 X 射线激光的显著放大,实验中, Rocca 采用了从 10% 到 90% 上升沿为 20 ns 的高压脉冲激励 Ar, 获得了 $J=0-1$ 的类氩氙 46.9 nm 激光输出,增益系数 $0.6 \pm 0.04 \text{ cm}^{-1}$,采用的毛细管内径为 4 mm,长度为 12 cm。这是国际上首次有采用毛细管放电实现类氩氙 46.9 nm 软 X 射线激光输出的报道。此后,国际上就陆续有其他研究小组关于采用毛细管放电泵浦实现类氩氙 46.9 nm 软 X 射线激光的报道^[4-8]。

激光的输出强度弱一直是制约 46.9 nm 软 X 射线激光器走向实用化的一个关键因素,在提高激光输出强度的研究中,各国科学家通过寻找最佳的放电条件、增加毛细管长度以及提高脉冲电压以实现在更高工作气压下获得更强的激光输出等方法在一定程度上获得了较强的激光,例如 Rocca 小组在 1999 年,在采用 34.5 cm 长的毛细管放电实验中获得了 0.88 mJ 的 46.9 nm 软射线激光。此外,1994 年, Rocca 小组^[3]还在 Ar 中掺入 H_2 以验证能否通过气体掺杂获得更强的激光输出,然而,掺入 H_2 后获得的激光强度只有相同放电条件下使用纯 Ar 作为激光介质时的 1/2,从此就没有别的研究小组有气体掺杂实验的相关报道。由

于笔者实验过程中采用的主脉冲电流前沿比较陡,可能导致获得激光输出时等离子体温度过高而不利于获得高强度的激光。受到 Rocca 小组混合气体放电实验的启发,并结合考虑 CO_2 等气体激光器^[9-10]工作介质中辅助气体的作用,笔者希望在放电过程中,在 Ar 中掺入适量的其他成份气体以控制等离子体状态,最终获得更高强度的激光输出。

1 实验装置

参考文献[7]中详细地描述了毛细管放电软 X 射线激光装置。装置的工作流程如图 1 所示,预脉冲电源产生对毛细管中气体介质 (Ar 或 Ar-He、Ar-Ne、Ar-Kr 和 Ar- N_2 的混合气体) 进行预电离的脉冲高压,预电离的目的是获得轴向较为均匀的低价等离子体,与此同时预脉冲电源输出一路信号使得闸流管工作,产生 1 kV 左右的脉冲信号触发高压脉冲发生器产生 30 kV 左右的高压脉冲信号触发 Marx 发生器(十级)中的第一对火花隙开关,使其中预先以并联形式充电完毕的电容器级联放电来获得很高的脉冲电压输出,该高压对 Blumlein 传输线充电,当充电电压达到某一值时主开关导通,经过 Blumlein 传输线整形的脉冲高压击穿预电离后的毛细管形成脉冲电流,称之为主脉冲电流。主脉冲电流流过毛细管时形成磁场作用于预电离形成的等离子体,使等离子体向轴心箍缩。箍缩过程中,随着相同单位体积内等离子体密度的增加,原子、离子及电子的碰撞变得更为频繁,导致了电子温度的升高,形成类氩氙离子,并在合适的电子温度、密度和离子温度的条件下,实现类氩氙 46.9 nm 软 X 射线激光输出。

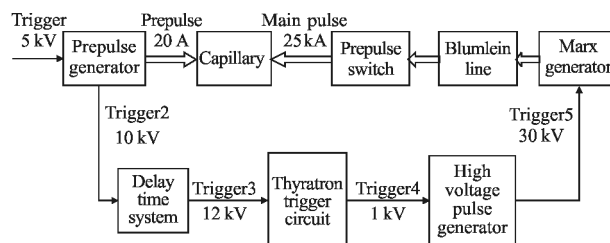


图 1 毛细管放电实验装置工作流程

Fig.1 Workflow of the equipment

选用 Andor 公司的 McPherson248/310G 型 Rowland 谱仪标定激光波长,谱仪采用掠入射工作方式,探测精度为 0.08 nm。X 射线 CCD(Andor DO420-BN-995)

记录放电产生的谱线信息,谱仪通过计算机控制,将探测到的谱线信息显示在计算机上。

X 射线二极管(XRD)用以分析毛细管放电产生软 X 射线辐射信号的时间特性。

2 实验结果及分析

为了系统地分析混合气体放电实验中激光输出强度的变化,实验中在纯 Ar 中分别掺入各种比例的 Ne、Kr、N₂ 和 He,以分析各种气体对激光强度的影响。图 2 为毛细管中充以 28.5 Pa 纯 Ar 和 Ar 与 Ne、Ar 与 Kr 以及 Ar 与 N₂ 等混合气体放电实验中的相同幅值和上升沿的主脉冲电流和 XRD 获得的信号,混合气体中的 Ar 为 28.5 Pa,掺入的 Ne、Kr 和 N₂ 均为 2 Pa,从图中可以看出,混合气体作为工作介质时获得的激光尖峰的幅值要明显低于纯 Ar 时获得的激光尖峰的幅值,而且激光的产生时间均随管内初始气压的增加而增加。

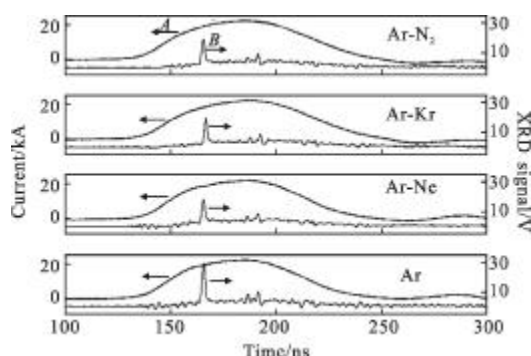


图 2 掺杂气体放电实验中的相同幅值和上升沿的主脉冲电流(A)和 XRD 信号(B)

Fig.2 Main current(A) with the same amplitude and rise time and XRD signals(B) of mixing air charging experiment

图 3 为输出激光强度随混合气体气压的变化情况

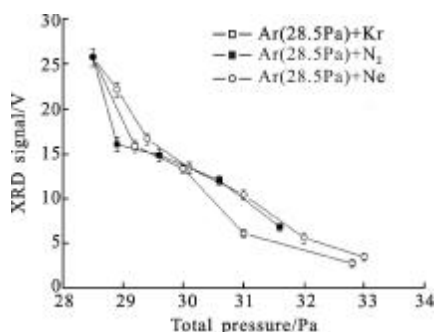


图 3 激光尖峰随掺杂气体总气压的变化情况

Fig.3 Variation of the laser spike with the mixture pressure

况,此时,保证管内的 Ar 气压为 28.5 Pa。从图中可以看出,随着混合气体中 Ar 比例的下降,激光输出强度迅速下降。

由于 He 作为惰性气体,性质稳定,而且 He 的电子结构简单,放电时不会产生大量的离子污染等离子体,因此在气体掺杂的实验中,重点分析了 He 的掺入对激光强度的影响。

图 4 为示波器获得的典型的主脉冲电流与 XRD 信号,主脉冲电流幅值为 22 kA,XRD 获得的激光尖峰信号中实线和点线分别为 28.5 Pa 纯 Ar 以及 28.5 Pa Ar 与 2 Pa He 的混合气体放电时的波形,其中第一尖峰幅值分别为 28.9 V 和 42.1 V(170 ns 以后的几对尖峰为 XRD 与示波器连接的两段同轴电缆的反射峰),相对于 Ar,混合气体放电时激光的输出强度提高了 45.6%,但背景信号未见明显增强,可以初步断定纯 Ar 中充入适量的 He 有利于获得更高强度的激光输出。国际上一般用增益长度积(即 gL 值,其中 g 为小信号增益系数, L 为毛细管长度)来表征激光强度水平,从实验结果可以看出,放电过程中,在 28.5 Pa 的 Ar 中掺入 2 Pa 的 He 时 gL 值增加,由于实验过程中毛细管长度不变,即 L 值不变,也就是说适量的 He 有利于提高小信号增益系数 g 值。

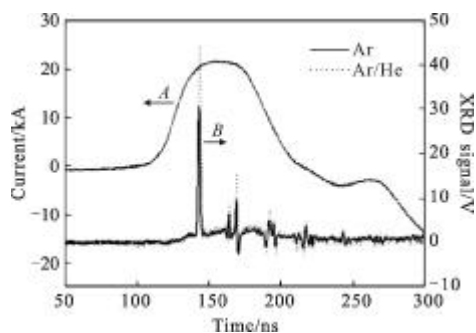


图 4 纯 Ar 和 Ar-He 混合气体放电实验中的主脉冲电流(A)和 XRD 信号(B)

Fig.4 Main current(A) and corresponding XRD signals(B) of pure Ar and Ar-He mixture

图 5 为 Rowland 谱仪捕获的相对于图 4 中的 Ar-He 混合气体和纯 Ar 放电时 46.9 nm 的激光波长信息,从图中可以看出,波长并未发生漂移,而且当谱仪入射光狭缝相同时,掺入适量 He 时,谱线强度较纯 Ar 时强。

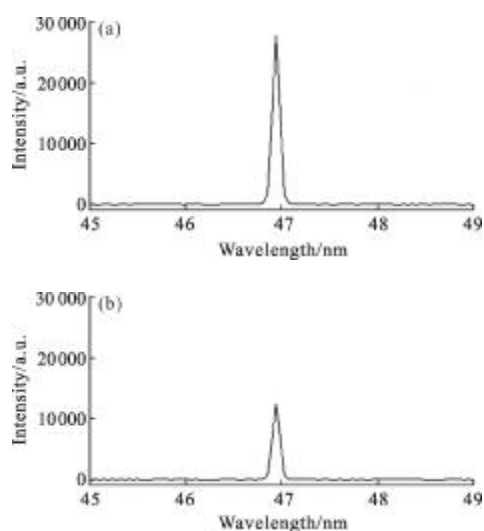


图5 类氩氦 46.9 nm 软 X 射线激光谱线,其中(a)为放电过程中掺 He 时的谱线,(b)纯 Ar 作为工作介质时的谱线

Fig.5 Spectrum of the emission corresponding to capillary filled with mixed Ar with He(a) and pure Ar (b)

为了详细地分析气体 He 对激光增益的影响,对比了毛细管中 Ar 气压不变总气压随着 He 气的掺入而增加和毛细管中总气压不变而 He 的比例发生变化的实验结果。图 6 为毛细管内 Ar 气压保持不变时 (28.5 Pa), 激光尖峰幅值随管内混合气体总气压的变化情况, 尖峰幅值的变化直观的反应了输出激光强度的变化趋势, 实验中保证其他放电参数一致 (包括预主脉冲延时时间, 预主脉冲幅值等)。从图中可以看出, 在特定的放电条件下, 当 Ar 气压保持不变的情况下, 掺入 He 气压在一定的范围 (<6.5 Pa) 内有利于提高激光输出强度, 在掺入 2 Pa 的 He 时, 激光尖峰出现极大值, 也就是说此时的激光输出强度最高。

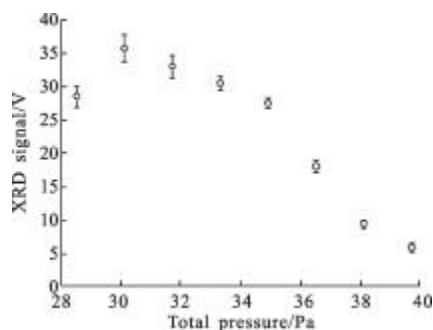


图6 Ar 气压为 28.5 Pa, 激光尖峰幅值随总气压变化

Fig.6 Variation of the laser spike with the total air pressure when Ar is 28.5 Pa

图 7 为保持毛细管内混合气体总气压保持不变

时 (28.5 Pa), 激光尖峰与混合气体中 He 比例的关系。从图中可以看出当管内混合气体总气压不变时, He 的比例低于 7% 有利于提高激光的输出强度, 而且在 He 的比例为 6.3% 附近获得了最高幅值的激光尖峰。结合图 4 的实验结果, 激光输出强度的极值出现在混合气体气压为 30.1 Pa 附近, 按混合气体中 He 最佳比例为 6.3% 计算此时掺入的 He 气压为 1.9 Pa, 与实验掺入 He 气压为 2 Pa 时获得最幅值激光输出的结果吻合 (由于受到充气阀的调节精度的限制, 不能达到更高的细分混合气压比的目的, 因而, 笔者认为 0.1 Pa 的气压差应该在可以接受的误差范围内)。

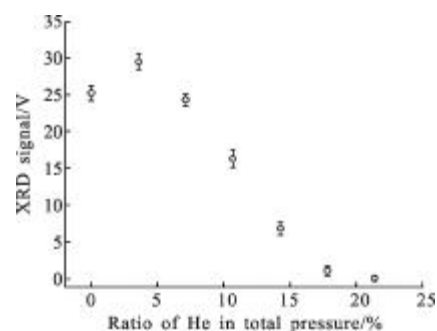


图7 总气压 28.5 Pa 时, 激光尖峰幅值随 He 比例的变化关系

Fig.7 Variation of the laser spike with the He ratio when the total pressure is 28.5 Pa

实验的出发点是希望在 Ar 中掺入适量的 He 来控制等离子体的状态, 从而达到获得更高强度激光输出的目的, 而在现有的实验条件下, 等离子体的控制主要体现在对等离子体温度的控制上。由于目前缺乏有效的手段用以精确地测量放电之后箍缩过程中等离子体的温度, 文中将通过激光产生时间的变化情况的描述来分析等离子体温度的变化情况。大量的实验数据表明在 Ar 的放电实验中, 随着管内初始气压的增加, 激光的产生时间单调递增, 这是由于随着 Ar 气压的增加, 管内初始的等离子体密度增加, 相同体积的等离子体壳层中所包含的等离子体质量增加, 在相同幅值的主脉冲电流作用下, 指向 Z 轴 (毛细管径向) 的加速度减小, 等离子体箍缩到半径最小时刻的时间变长 (国际上一般定义等离子体箍缩到半径最小时刻的时间为激光的产生时间), 因而激光的产生时间也相应增加。在掺杂实验中, 激光的产生时间在管内 Ar 气压不变的情况下不随掺杂气体气压的增加而增加。将主脉冲开始作用于等离子体到等离子体箍缩到半径最小时刻的时间间隔分为两个部分, 第一部分为等离子体脱离毛细管管壁的

时间,定义为 t_1 ,第二部分为等离子体脱离管壁之后到等离子体箍缩到半径最小时刻的时间,定义为 t_2 ,激光的产生时间 $t=t_1+t_2$,其中 t_1 与初始的等离子体密度有关,由于混合气体气压高,因而混合气体中的 t_1 要大于相同条件下的 Ar,但由于激光产生时间 t 不变,所以 t_2 应相应的减小, t_2 的大小受等离子体的动力压强和磁压强影响,磁压强的大小由主脉冲电流决定,由于实验中选取了相同幅值和上升沿的主脉冲电流,因而混合气体与纯 Ar 时的磁压强相同,所以 t_2 的减小只归因于动力压强的减少,而动力压强的大小取决于等离子体的密度与温度,相比于纯 Ar,混合气体的等离子体密度高,因而,动力压强的减少是由于等离子体温度的降低所引起的,换言之, t_2 的减小也是由于掺入 He 后等离子体温度的降低引起的,也就是说等离子体温度的降低引起的 t_2 的减小抵消了由于管内气压的增加而导致的 t_1 的增加。

毛细管放电泵浦软 X 射线激光的产生需要满足一定等离子体温度条件(约 60 eV),在此前提下,激光增益的高低也受等离子体温度的影响,由于装置产生的主脉冲电流上升沿较陡,对等离子体的箍缩较为剧烈,导致等离子体温度偏高,降低了激光增益,也就体现在了激光输出强度的降低上,在纯 Ar 中掺入适量的 He 降低了等离子体的温度,获得了较高的激光增益,最终实现更强度的激光输出。

对比 He 的掺杂实验,分析其他气体的掺入导致激光幅值迅速下降的原因有如下两个方面:

(1) He 的原子序数低,单个原子的质量小,在等离子体箍缩中对箍缩过程的影响小,而在掺入相同比例的 Kr、Ne 和 N_2 等气体时,由于这三种气体原子或分子质量接近 Ar 或者比 Ar 的质量高,对箍缩过程的影响比较大,导致了相同条件下等离子体箍缩时的箍缩速度的下降,使得产生激光时的等离子体密度和温度等状态不能满足实现激光输出的最佳条件,最终导致了激光幅值的下降。

(2) 由于 He 电离后的能级结构简单,可能导致放电过程中与 Ar 离子能级间没有产生共振吸收或者共振吸收少,而 Kr、Ne 和 N_2 等气体放电过程中,能级结构复杂,可能会导致较多的共振吸收,使得产生类氦 46.9 nm 激光的两个能级间的反转粒子数的减少,最终引起了激光幅值的下降。

4 结 论

通过选择在纯 Ar 中充入合适比例的 He,实现了

大幅度提高激光增益,最终获得更高输出强度的目的,即在不改变介质增益长度 L 的情况下,通过增益系数 g 值的提高,获得更高的增益,弥补了国内外在毛细管放电实验中混合气体研究方面的空白。目前在放电等离子体极紫外光刻(EUV)光源的研究方面,通过在工作介质 Xe 中掺入适量的 He 以提高 13.5 nm 辐射的强度也已成为了一种较为常用的手段。

参考文献:

- [1] Gaeta C J, Rieger H, Turcu I C E, et al. High-power collimated laser-plasma source for proximity X-Ray nanolithography [J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2003, 21(1): 280-287.
- [2] Izumi N, Snavely R, Gregori G, et al. Remington application of imaging plates to X-ray imaging and spectroscopy in laser plasma experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(10): 325-1-325-5.
- [3] Rocca J J, Shlyaptsev V, Tomasel F G, et al. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. Physical Review Letters, 1994, 73(6): 2192-2195.
- [4] Ben-Kish A, Shuker M, Nemirovsky R A, et al. Plasma dynamics in capillary discharge soft X-ray lasers [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(1): 015002.
- [5] Niimi G, Hayashi Y, Nakajima M, Watanabe M, et al. Observation of multi-pulse soft X-ray lasing in a fast capillary discharge [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 34(14): 2123-2126.
- [6] Tan C A, Kwek K H. Development of a low current discharge-driven soft X-ray laser [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(16): 4787-4792.
- [7] Zhao Y P, Chen Y L, Wu Y C, 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(2): 342-346.
- [8] Zhao Y P, Jiang S, Xie Y, et al. Demonstration of soft X-ray laser of Ne-like Ar at 69.8 nm pumped by capillary discharge [J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3458-3460.
- [9] Qu Yancheng, Ren Deming, Zhao Weijiang, et al. Experimental research on miniature folded cavity TEA CO_2 Laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 632-634, 655. (in Chinese)
- [10] Shao Mingzhen, Shao Chunlei. Design of structure and optimization of flow field for mainframe of high power TEA CO_2 Laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1508-1513. (in Chinese)