

Ar-He 混合气体气压对类氩氦 46.9 nm 激光输出特性的影响

李家祺¹, 崔怀愈^{1,2*}, 赵东迪¹, 安博¹, 赵永蓬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哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 探究了在毛细管内充入气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体条件下, 初始气压对 46.9 nm 激光输出特性的影响。通过测量 Ar-He 混合气体产生 46.9 nm 激光的气压范围和每个气压下对应的激光强度与光斑形态信息, 总结出激光输出特性与初始气压的关系。然后, 从等离子体柱的角度分析了混合气体初始气压对激光光斑的影响, 得到了混合气体初始气压导致 46.9 nm 激光输出特性发生变化的原因。以上对激光特性的研究对于提高激光幅值和改变光斑形状有益。

关键词 X 射线光学; 46.9 nm 激光; 毛细管放电; Ar-He 混合气体; 激光光斑

中图分类号 TN248.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134022

Influence of Ar-He Mixture Gas Pressure on Output Characteristics of Ne-like Ar 46.9 nm Laser

Li Jiaqi¹, Cui Huaiyu^{1,2*}, Zhao Dongdi¹, An bo¹, Zhao Yongpeng¹

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

²Research Center for Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China

Abstract The effect of initial pressure on the output characteristics of the 46.9 nm laser is investigated when the Ar-He mixture with a pressure ratio of 8:1 is filled into the capillary. By measuring the pressure range of 46.9 nm laser produced by Ar-He mixture, and the corresponding laser intensity and spot shape information at each pressure, the relationship between laser output characteristics and initial pressure of Ar-He mixture is summarized. Then, the influence of the initial pressure of Ar-He mixture on the laser spot is analyzed from the point of view of the plasma column, and the reason for the change of the output characteristics of 46.9 nm laser caused by the initial pressure of the Ar-He mixture is obtained. The above research on the laser characteristics is beneficial to improve the laser amplitude and change the shape of the laser spot.

Key words X-ray optics; 46.9 nm laser; capillary discharge; Ar-He mixture; laser spot

1 引言

46.9 nm 激光具备现有其他光源很难同时拥有的短波长、窄脉宽和较高脉冲瞬时功率等诸多特点, 因此该波段的激光在诸多领域中具有广阔的应用前

景, 如生物样本检测、实时快化学反应研究、光刻技术、材料科学和极紫外波段非线性光学等。自类氩氦 46.9 nm 激光产生以来^[1], 许多小组都对类氩氦 46.9 nm 激光的时间特性和空间特性进行了探究^[2-9]。美国小组率先提出了毛细管放电泵浦产生

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-03-08; 录用日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金(61875045, 62005066)

通信作者: *cuihuaiyu_hit@163.com

X 射线的方案,再将其应用于类氩氩(Ar^{8+})离子,获得了 46.9 nm 激光输出。该小组后续又对 46.9 nm 激光的幅值、脉宽等特性进行了测量和理论分析,并在实验上对其强度空间分布情况进行了观测。日本小组^[10]、意大利小组^[11]、俄罗斯小组^[12]也陆续通过毛细管放电泵浦方案获得了 46.9 nm 激光输出,并开展了大量相关研究。自此,世界范围内对类氩氩 46.9 nm 激光的研究相对比较成熟。美国小组曾进行过在工作气体 Ar 中掺入辅助气体 H_2 的实验^[1-2],但掺入 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。因此,之后各小组的实验探究均在毛细管内充入纯 Ar 的条件下进行。在工作气体中加入辅助气体是改善某些气体激光器输出特性的有效手段,而本领域缺少在工作气体 Ar 中掺入其他辅助气体的实验研究。因此,本课题组探索了在类氩氩 46.9 nm 激光工作介质中加入辅助气体产生的影响。本课题组在工作气体 Ar 中分别掺入 N_2 、Kr、Ne 和 He 等多种辅助气体,并进行了实验^[13],观察到当工作气体 Ar 中充入合适比例的 He 时,可以得到较大幅度的激光强度提升,而掺入其余辅助气体则会使激光强度下降。随后,本课题组开展了在 Ar 中掺入不同气压的 He 对激光输出特性的影响的研究,得到了

使激光强度得到最大提升的 Ar-He 气压比,并进行了模拟计算和理论分析^[14]。

本文在文献[14]的基础上,按照其中实验所确定的最佳 Ar-He 气压比(8:1)定制了气压比固定为 8:1 的 Ar-He 混合气体,改变充入毛细管内混合气体的初始气压,在实验上探究气压对毛细管放电类氩氩 46.9 nm 激光的时间特性和空间特性的影响,并分析产生影响的可能原因。

2 实验装置和实验结果

2.1 实验装置介绍

实验装置由毛细管放电装置和测量设备构成,与本课题组此前研究类氩氩 46.9 nm 激光时使用的装置基本一致。毛细管放电装置如图 1 所示,主要由 Marx 发生器、主开关、预脉冲系统、Blumlein 传输线和毛细管组成。Marx 发生器在放电时会产生 200~300 kV 的高压脉冲。预脉冲会提前将毛细管中的工作气体电离成低价离子。Blumlein 传输线对高压脉冲进行整形。在延时后,利用主开关控制传输线对毛细管中初始等离子体放电,将等离子体箍缩并产生 46.9 nm 激光的增益介质,激光在增益介质中产生和放大。然后,激光进入真空靶室中,由靶室中的测量设备完成测量。

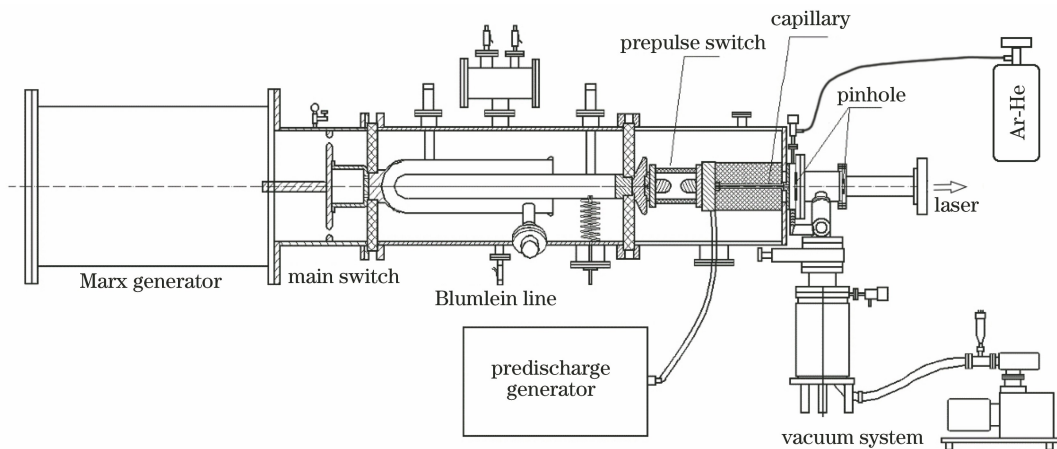


图 1 毛细管放电装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of capillary discharge device

测量光路如图 2 所示,激光进入真空靶室后,经两层铝膜衰减投射到电荷耦合器件(CCD)上。在激光输出特性的测量方面,使用自制的 X 射线二极管(XRD)来测量激光脉冲波形,使用软 X 射线 CCD 相机(Andor, iKon-M DO934P-BN)来观察光斑的空间分布并计算激光发散角。CCD 相机的像素个数为 1024×1024 ,每个像素尺寸为 $13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$ 。

XRD 被安装在电动光学平移台上,可以在真空靶室外控制 XRD 移入和移出光路。每层铝膜厚度为 400 nm,46.9 nm 激光经过两层铝膜后的透射率约为 15%,铝膜在滤除紫外、可见光等长波长光的同时可以对 46.9 nm 激光进行衰减,防止 CCD 饱和。由图 2 可知,毛细管出光口与 CCD 间的距离约为 254 cm,故实验中拍摄到的光斑属于远场光斑。

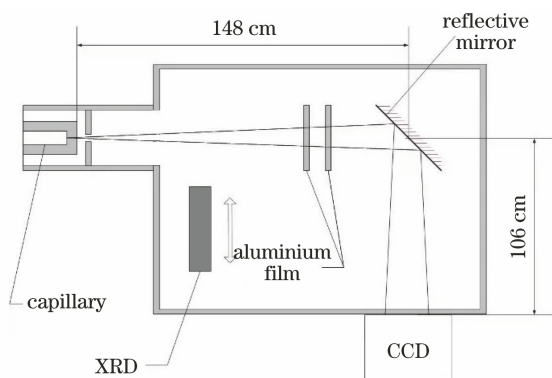


图 2 测量光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring optical path

2.2 实验结果

实验时分别对纯 Ar 条件下产生的激光和气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体条件下产生的激光进行测量,将测量结果汇总并进行对比分析。

在主脉冲电流幅值均为 11.5 kA 且波形基本一致的条件下,典型的激光脉冲信号如图 3 所示。纯 Ar 气体在最佳气压(20.2 Pa)下的激光脉冲幅值为 5.16 V、激光脉宽为 1.1 ns。气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体在最佳气压(22.0 Pa)下的激光脉冲幅值为 6.56 V、激光脉宽为 1.2 ns。可以看出,混合气体在最佳气压条件下的激光脉冲幅值比起纯 Ar 而言有约 27.2% 的提升,而激光脉宽的变化并不明显。由此可知,使用 8:1 的 Ar-He 混合气体相比使用纯 Ar 气体而言可以有效提高激光光强,而对增益的持续时间没有明显的影响。

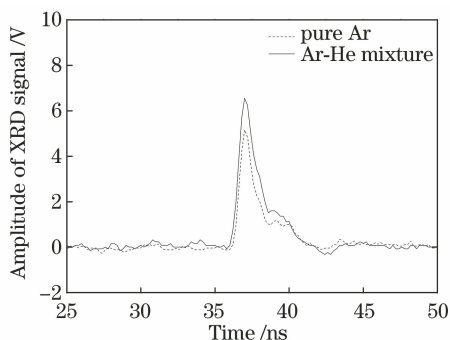


图 3 Ar-He 混合气体与纯 Ar 的激光脉冲波形

Fig. 3 Laser pulse waveforms of Ar-He mixture and pure Ar

当放电产生 46.9 nm 激光时,等离子体中主要为 Ar^{8+} 离子。在产生 Ar^{8+} 离子的等离子体温度条件下,He 的外层电子足以被全部电离,故 He 离子不会像 He-Ne 激光器一样通过共振能量转移将激发能转移给 Ar^{8+} 离子。虽然 He 的掺入可能会影响产生激光时的等离子体的状态,但是 He 离子不会直接参与激光的产生,进而当 8:1 的 Ar-He 混合

气体在最佳气压(22.0 Pa)时,混合气体中 Ar 的气压与纯 Ar 气体的最佳气压(20.2 Pa)大致相同。

整理在毛细管内充入纯 Ar 气体时测得的不同气压下的激光脉冲信号的幅值,并绘制成曲线,如图 4 中虚线所示。然后,整理在毛细管中充入 Ar-He 气压比为 8:1 的混合气体时测得的激光脉冲信号的幅值,并绘制成曲线,如图 4 中实线所示。由图 4 可以看出,不同气体条件下得到的激光信号幅值随气压的变化都呈现先增大后减小的趋势。Ar-He 混合气体可产生激光的气压范围为 14.6 ~ 34.0 Pa,最佳气压约为 22.0 Pa。纯 Ar 气体可产生激光的气压范围为 13.2 ~ 26.5 Pa,最佳气压为 20.2 Pa。当气压高于最佳气压并继续增加时,与纯 Ar 气体相比,混合气体产生的激光的光强下降更缓慢,能够在一定气压范围内维持较高的输出水平。由此可以看出,使用 8:1 的 Ar-He 混合气体相比纯 Ar 气体而言,在能够获得更高强度的激光输出的同时,能够扩大产生激光的气压范围。

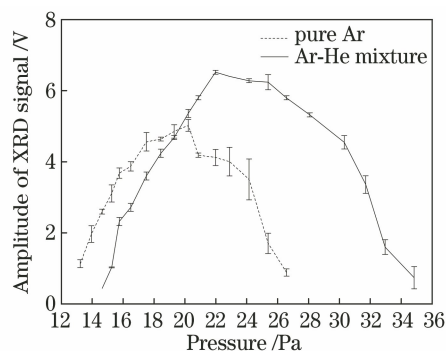


图 4 Ar-He 混合气体与纯 Ar 气体激光脉冲幅值随气压变化

Fig. 4 Laser pulse amplitudes of Ar-He mixture and pure Ar varying with air pressure

在实验测定激光脉冲强度时,待 XRD 测量幅值基本稳定后,通过光学平移台将 XRD 移出光路,用 CCD 相机对光斑形态进行拍摄,可得到不同气压下的光斑形态图像。图 5~9 中左图为 46.9 nm 激光在压强为 15.3 ~ 31.7 Pa 范围内的 8:1 的 Ar-He 混合气体下的光斑经高频滤波之后的图像。

在拍摄到的图像中通过光斑中心在水平方向读取激光的相对强度,绘制 46.9 nm 激光空间光强分布曲线,如图 5~9 中右图所示。参照美国、意大利等小组的研究^[6-8],本文在分析环形光斑时同样采用最外侧的峰-峰发散角作为光斑发散角。若在光强分布曲线中得到两个相对强度峰值间的像素数 X ,则根据激光出光口到 CCD 的距离(254 cm)和 CCD 每个像素的尺寸($13 \mu m \times 13 \mu m$),可计算得到光斑

的峰-峰发散角为 $2\arctan[13X/(2 \times 254 \times 10^4)]$ 。

在 Ar-He 混合气体气压为 15.3 Pa 的条件下, 拍摄到的实心光斑如图 5 所示。由径向分布曲线可

知: 此时光斑的水平方向直径为 $310.7 \mu\text{m}$, 半峰全宽发散角为 1.29 mrad, 光斑的能量集中在中心亮点附近; CCD 相对强度峰值为 112, 光强较低。

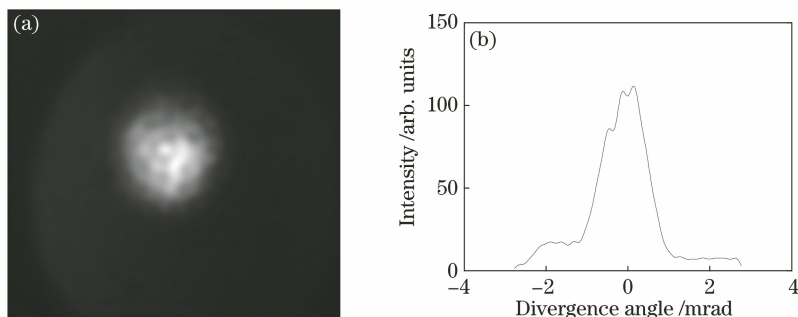


图 5 15.3 Pa 气压下 Ar-He 混合气体光斑图像和空间光强分布曲线。(a) 光斑图像; (b) 空间光强分布曲线

Fig. 5 Spot image and spatial light intensity distribution curve of Ar-He mixture under 15.3 Pa pressure.

(a) Spot image; (b) spatial light intensity distribution curve

在 Ar-He 混合气体气压为 18.4 Pa 的条件下, 拍摄到近似为双环状的光斑, 如图 6 所示。由径向分布曲线可知: 此时光斑外环的水平方向直径为

$616.2 \mu\text{m}$, 峰-峰发散角为 2.56 mrad, 光斑的能量集中在环形附近; CCD 相对强度峰值为 439, 整体光强有所提高。

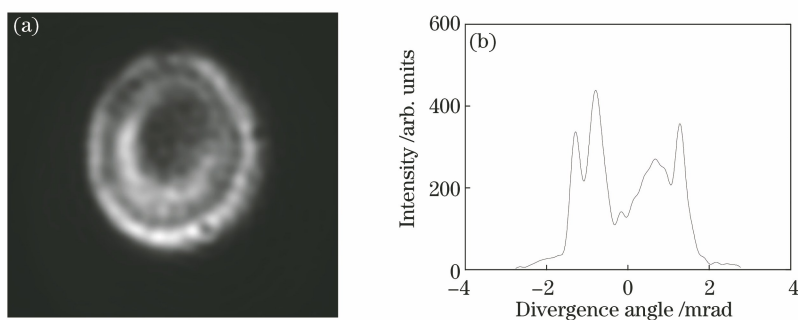


图 6 18.4 Pa 气压下 Ar-He 混合气体光斑图像和空间光强分布曲线。(a) 光斑图像; (b) 空间光强分布曲线

Fig. 6 Spot image and spatial light intensity distribution curve of Ar-He mixture under 18.4 Pa pressure.

(a) Spot image; (b) spatial light intensity distribution curve

在 Ar-He 混合气体气压为 22.0 Pa 的条件下, 拍摄到近似为双环状的光斑, 如图 7 所示。根据径向分布曲线, 测量环形光斑最外侧的尖峰间距离, 得到此时光斑外环的水平方向直径为 $830.7 \mu\text{m}$, 峰-

峰发散角为 3.23 mrad, 光斑的能量集中在环形附近。CCD 相对强度峰值为 657, 光强达到最大。

在 Ar-He 混合气体气压为 25.4 Pa 的条件下, 拍摄到近似为单环状的光斑, 如图 8 所示。根据径

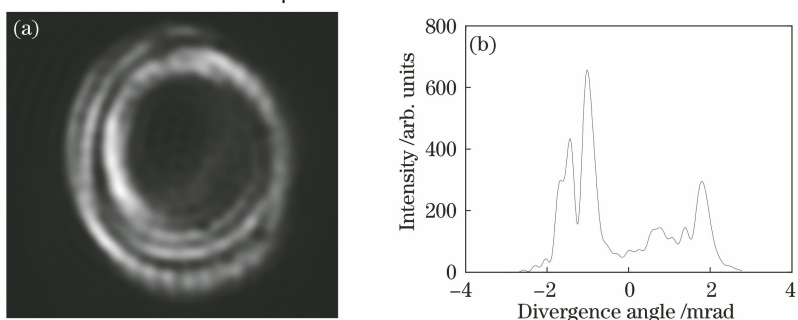


图 7 22.0 Pa 气压下 Ar-He 混合气体光斑图像和空间光强分布曲线。(a) 光斑图像; (b) 空间光强分布曲线

Fig. 7 Spot image and spatial light intensity distribution curve of Ar-He mixture under 22.0 Pa pressure.

(a) Spot image; (b) spatial light intensity distribution curve

向分布曲线,测量环形光斑最外侧的尖峰间距离,得到此时光斑外环的水平方向直径为 $882.7 \mu\text{m}$,峰-

峰发散角为 3.45 mrad ,光斑的能量集中在环形附近。CCD 相对强度峰值为 272,光强降低。

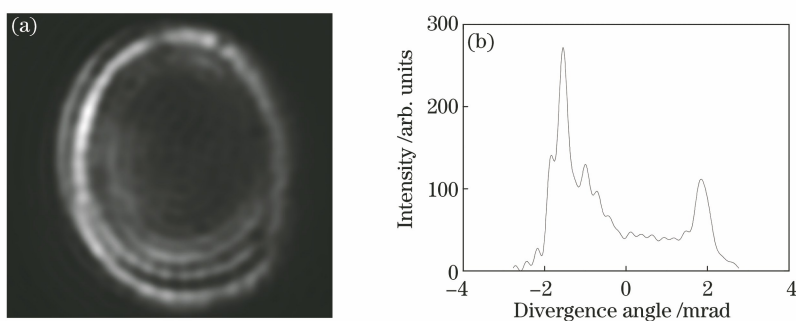


图 8 25.4 Pa 气压下 Ar-He 混合气体光斑图像和空间光强分布曲线。(a)光斑图像;(b)空间光强分布曲线

Fig. 8 Spot image and spatial light intensity distribution curve of Ar-He mixture under 25.4 Pa pressure.

(a) Spot image; (b) spatial light intensity distribution curve

在 Ar-He 混合气体气压为 31.7 Pa 的条件下,拍摄到的光斑外侧为单环状,内部出现实心亮斑,如图 9 所示。由径向分布曲线可知:此时光斑外环的水平方向直径为 $406.9 \mu\text{m}$,峰-峰发散角为 3.28 mrad ,中

心亮点的半峰全宽发散角为 1.50 mrad ,光斑的能量集中在外环和中心亮点附近;CCD 相对强度峰值为 54,整体光强降低。

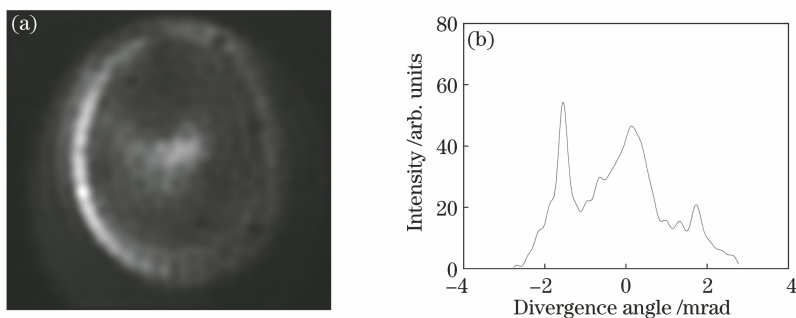


图 9 31.7 Pa 气压下 Ar-He 混合气体光斑图像和空间光强分布曲线。(a)光斑图像;(b)空间光强分布曲线

Fig. 9 Spot image and spatial light intensity distribution curve of Ar-He mixture under 31.7 Pa pressure.

(a) Spot image; (b) spatial light intensity distribution curve

由光斑测量图像和光强分布曲线图可以看出:当气压较低时光斑的环形比较小,且当气压很小时会聚成一个亮点,激光的能量主要集中于光环附近;随着气压的增加,环形的半径会逐渐增大,光斑发散角增大;在气压升高到最佳气压后,继续升高气压,外侧环的大小变化减慢,而内侧环内径会继续随气压升高而增大,最终形成类似单环的光斑结构;将气压继续升高,可以观察到光斑的中心开始变亮,出现一个亮度比外环更高的中心亮点。

整理不同混合气体气压下,光斑图像呈环形时的光斑外侧环的峰-峰发散角,并绘制成图像,如图 10 所示。可以看出,光斑发散角在混合气体气压升高时呈增大趋势。在纯 Ar 条件下,美国小组^[6]等多个研究小组也观察到了光斑发散角在纯 Ar 气体气压升高时呈增大趋势。当混合气体气压低于最佳

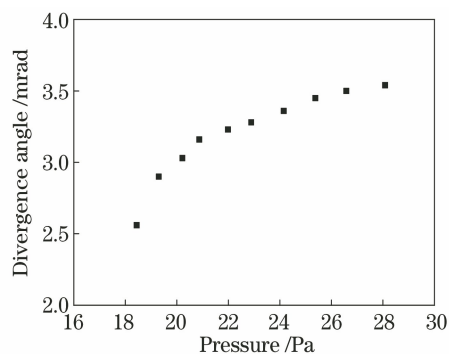


图 10 不同 Ar-He 混合气体气压下激光发散角
Fig. 10 Laser divergence angles under different Ar-He mixture gas pressures

气压时,光斑发散角随气压升高的增长速率较快。当混合气体气压高于最佳气压时,光斑发散角随气压升高的增长速率减慢。

3 分析与讨论

主脉冲电流流过毛细管时会产生 Z -箍缩效应,使等离子体在洛伦兹力作用下向轴心箍缩,得到一个柱长与直径比约为 1000:1 的等离子体柱。等离子体柱作为 46.9 nm 激光的增益介质,其性质影响了输出激光的强度与空间分布特性。该影响主要来源于等离子体柱内的电子温度和电子密度分布两个方面。

电子温度决定了增益的大小,直接影响输出激光的强度。在 Z -箍缩过程中,主脉冲电流使等离子体柱加速向轴心运动,在这个过程中磁能和电能转化成等离子体的热能,导致电子温度升高。电子温度的升高导致 Ar 离子电离产生自由电子,同时等离子体体积减小,使电子密度增加。当等离子体箍缩到轴心附近时,会产生高丰度的 Ar^{8+} 离子,此时等离子体的电子温度和电子密度条件达到形成类氩 $3p-3s$ 激光增益的条件,通过自发辐射光放大原理可获得 46.9 nm 激光脉冲。当充入毛细管的气体气压过低时,毛细管内的等离子体柱受压缩程度过高,电子温度过高,等离子体发生过电离,进而无法产生 Ar^{8+} 离子,此时不能满足增益条件,无法产生 46.9 nm 激光。当充入毛细管的气体气压过高时,毛细管内的等离子体柱受压缩不足,电子温度过低,产生的增益过低,进而也无法产生 46.9 nm 激光脉冲。

电子密度分布影响输出激光的空间分布特性,同时也间接影响输出激光的强度。46.9 nm 激光的传播模型如图 11 所示。其中,圆柱体为等离子体柱,即洛伦兹力作用下生成的柱状增益介质, a 为等离子体柱半径, L 为等离子体柱长度。等离子体柱的电子密度分布近似有柱对称的特性,柱内的粒子只在直径方向上发生密度的变化,在轴向始终是均匀的。这种特性会使激光在传输和增益的过程中产

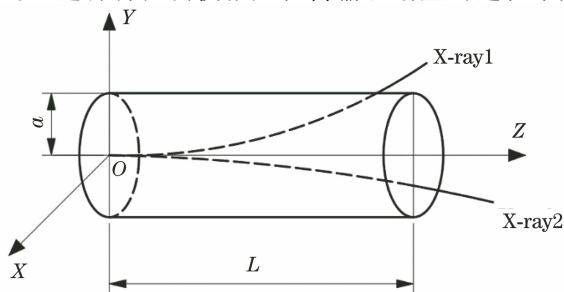


图 11 46.9 nm 激光的传播模型

Fig. 11 Propagation model of 46.9 nm laser

生各向相同的折射效应,导致光斑的光强分布大致呈现环形。等离子体柱内靠近轴心部分的电子密度高于外围,因此激光在等离子体内传输时会因折射作用而向外偏折。随着气压的升高,折射作用会逐渐增强,导致输出激光的光斑发散角增大。

根据偏折程度的不同,等离子体柱内的光线传播路径大致分为两类,分别用 X-ray1 和 X-ray2 表示,其中:X-ray1 代表受折射效应影响较大的光线路径,从等离子体柱的侧面出射;X-ray2 代表受折射效应影响较小的光线路径,从等离子体柱的正面出射。在低气压下,偏折效应较弱,沿 X-ray1 路径传播从侧面出射的光线非常少,几乎全部的光线都沿着 X-ray2 的路径传播从正面出射,因此得到的光斑较小,光强集中在光斑的中心。随着气压的升高,偏折效应增强,一部分光线沿 X-ray1 路径传播,从等离子体柱的侧面出射,构成光斑外环,另一部分沿 X-ray2 路径传播从正面出射的光线随着毛细管内气体气压的升高而变得发散,构成光斑内环。随着气压继续升高,偏折效应继续增强,沿 X-ray2 路径传播从正面出射的光线逐渐减少至消失,大部分光线沿 X-ray1 路径传播从侧面出射,出现类似单环的结构。沿 X-ray2 路径传播从正面出射的光线相比沿 X-ray1 路径传播从侧面出射的光线而言,在等离子体中传播的时间更长,增益长度更长,光放大更加充分。因此,当气压较高时,增益长度的下降也会导致输出激光强度下降。

综上所述,气压通过影响等离子体柱内的电子温度和电子密度分布来改变 46.9 nm 激光的输出特性。当毛细管内充入的 Ar-He 混合气体的气压较低时,由箍缩作用产生的等离子体柱内部的电子密度梯度较小,激光在传播时的偏折程度也会较小,此时激光从等离子体柱的正面出射,且基本沿等离子体柱的轴心传播,光斑呈点状。然而,此时等离子体柱内电子温度过高,增益系数小,光线的增益长度积很小,故得到的激光光强很弱。当提高毛细管内 Ar-He 混合气体的气压时,等离子体柱内部的电子密度梯度增大,激光在传播时的偏折效应变得明显,一部分光线从等离子体柱侧面出射,光斑呈双环形。同时,等离子体柱内电子温度降低到合适范围内,增益系数增大,光线的增益长度积增大,激光光强增大,在 Ar-He 混合气体气压为 22.0 Pa 左右时增益长度积达到最大值,此时光强最大。若继续提高毛细管内气压,激光在等离子体柱内传播时受到偏折效应的影响更大,大部分光线从等离子体柱的侧面

出射,增益长度缩短,光斑近似呈单环形。此时,等离子体柱内电子温度过低,产生的增益降低,光线的增益长度积变小,得到的整体激光光强降低。

4 结 论

文献[14]的混合气体实验中采用两路充气方案,在毛细管中一路充入纯 Ar,另一路充入少量的纯 He 进行混合,最终发现 Ar 和 He 的气压比为 8:1 时 46.9 nm 激光最强。该方案的充气过程比较复杂,需要精确调整两种气体的气压,才能获得所需的气压比。根据文献[14]确定的最佳气压比,定制了一瓶气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体替代纯 Ar 作为放电介质以开展实验,进而可以在混合气体气压比不变的情况下进行实验探究。

实验结果表明,以气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体作为工作物质的毛细管放电 46.9 nm 激光比起此前所使用的纯 Ar 气体作为工作物质输出的激光具有更高的激光强度和更广的气压范围。在毛细管中充入气压比为 8:1 的 Ar-He 混合气体条件下,随着气压的升高,输出 46.9 nm 激光的强度呈先增大后减小的趋势,光斑形态由实心原点变为环形结构,环形光斑的峰-峰发散角随着气压的升高逐渐增大。在混合气体气压为 22.0 Pa 时光强达到最大,此时光斑为双环形结构。以上结果为后续的进一步实验提供了参考。

未来拟进行改变预主脉冲延时、预脉冲电流和毛细管内径等参数的实验,探究 Ar-He 混合气体激光输出特性的变化规律。同时,也对 Ar-He 的气压比进行微调,探究更加精确的最佳气压比,以获得更优的激光输出条件。

参 考 文 献

- [1] Rocca J J, Tomasel F G, et al. Demonstration of a discharge pumped table-top soft-X-ray laser [J]. *Physical Review Letters*, 1994, 73(16): 2192-2195.
- [2] Rocca J J, Tomasel F G, Marconi M C, et al. Discharge-pumped soft-X-ray laser in neon-like argon [J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(6): 2547-2554.
- [3] Rocca J J, Beethe D G, Marconi M C. Proposal for soft-X-ray and XUV lasers in capillary discharges[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(7): 565-567.
- [4] Tomasel F G, Shlyaptsev V N, Rocca J J. Enhanced beam characteristics of a discharge-pumped soft-X-ray amplifier by an axial magnetic field [J]. *Physical Review A*, 1996, 54(3): 2474-2478.
- [5] Chilla J L A, Rocca J J. Beam optics of gain-guided soft-X-ray lasers in cylindrical plasmas[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1996, 13(12): 2841-2851.
- [6] Moreno C H, Marconi M C, Shlyaptsev V N, et al. Two-dimensional near-field and far-field imaging of a Ne-like Ar capillary discharge table-top soft X-ray laser[J]. *Physical Review A*, 1998, 58(2): 1509-1514.
- [7] Benware B R, Macchietto C D, Moreno C H, et al. Demonstration of a high average power tabletop soft X-ray laser[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(26): 5804-5807.
- [8] Tomassetti G, Ritucci A, Reale A, et al. Toward a full optimization of a highly saturated soft-X-ray laser beam produced in extremely long capillary discharge amplifiers[J]. *Optics Communications*, 2004, 231: 403-411.
- [9] Ritucci A, Tomassetti G, Reale A, et al. Investigation of a highly saturated soft X-ray amplification in a capillary discharge plasma waveguide[J]. *Applied Physics B*, 2004, 78(7/8): 965-969.
- [10] Niimi G, Hayashi Y, Nakajima M, et al. Observation of multi-pulse soft X-ray lasing in a fast capillary discharge[J]. *Journal of Physics D*, 2001, 34(14): 2123-2126.
- [11] Tomassetti G, Ritucci A, Reale A, et al. Capillary discharge soft X-ray lasing in Ne-like Ar pumped by long current pulses [J]. *The European Physical Journal D*, 2002, 19(1): 73-77.
- [12] Ostashev V I, Gafarov A M, Politov V Y, et al. Evidence of soft X-ray lasing in SIGNAL pulsed-power facility experiments with argon capillary plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 2368-2376.
- [13] 谢耀, 赵永蓬, 王骥. 提高毛细管放电类氩氦 46.9 nm 软 X 射线激光强度的研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2036-2040.
Xie Y, Zhao Y P, Wang Q. Research of enhancing the output of capillary discharge-pumped Ne-like Ar 46.9 nm soft X-ray laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2036-2040.
- [14] Zhao Y P, Zhao D D, Yu Q, et al. Influence of He mixture on the pulse amplitude and spatial distribution of an Ne-like Ar 46.9 nm laser under gain saturation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2020, 37(8): 2271-2277.