

# 激光对毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源的作用

张兴强 靳 龙

湖北汽车工业学院理学院, 湖北 十堰 442002

**摘要** 极紫外光刻技术(EUVL)利用波长为13.5 nm的极紫外(EUV)光源,可以轻松突破30 nm技术节点而实现大规模工业生产。毛细管放电直接将电能转换成等离子体的极紫外辐射能,具有较高的能量转换效率。毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源利用激光等离子体(LPP)的热膨胀力与三束等离子体所受的洛仑兹力相互作用,耦合出较大面积的极紫外辐射区,从而在满足用光要求的前提下大幅度地降低毛细管放电的重复频率,有利于光刻生产。在实现三对电极同时放电以及放电与激光同步触发的基础上,探讨了激光对耦合光源所起的作用。实验发现位置耦合对极紫外光源的影响很小,激光等离子体引起的动力耦合成为问题的关键,有待于逐步解决。

**关键词** 激光光学;极紫外光源;毛细管放电;三束等离子体;激光等离子体

**中图分类号** TN249; O539 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0602009

## Impact of Laser on Coupled Extreme Ultraviolet Source from Three Plasmas in Capillary Discharge

Zhang Xingqiang Jin Long

School of Science, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan, Hubei 442002, China

**Abstract** Extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology that harnesses extreme ultraviolet (EUV) source with wavelength of 13.5 nm can easily break through the technology node of 30 nm thus realize large-scale industrial production. Capillary discharge that directly converts electric power into EUV radiation power of the plasma has a higher conversion efficiency of energy. A coupled EUV source from three plasmas in capillary discharge, by making use of the interaction of the thermal expansion of laser produced plasma (LPP) with the Lorentz force received by three plasmas, produces a larger area of EUV radiation. Therefore, it greatly reduces the repetition rate of capillary discharge under the premise of the requirement for EUV utilization which is favorable for lithography production. On the basis of realizing concurrent discharge of three pairs of electrode and synchronized ignition of discharge with laser, the effect of laser on the coupled source is discussed. It is found from experiment that the positional coupling has so little influence on EUV source that the dynamical coupling caused by LPP becomes the key to the problem to be solved gradually.

**Key words** laser optics; EUV source; capillary discharge; three plasmas; laser produced plasma

**OCIS codes** 140.3440; 220.3740; 260.7190; 350.5400

## 1 引 言

进入21世纪以来,光电产品变得丰富多样,产品的安全、质量、效能、功耗、环保、智能化和微型化等得到了巨大的发展,这离不开光电产品集成度的提高。集成电路特别是大规模集成电路的生产成为一个国家先进制造水平的标志和综合国力的体现。

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-02-25

基金项目: 湖北省教育厅科研重点项目(D20102002)、湖北汽车工业学院博士科研启动基金(BK200919)

作者简介: 张兴强(1969—),男,博士,主要从事毛细管放电软X光激光和EUVL光源等方面的研究。

E-mail: zhangxingqiang.student@sina.com

光刻技术是集成电路生产的保障。光刻技术经过可见光光刻、深紫外光刻<sup>[1]</sup>、ArF浸没式光刻<sup>[2]</sup>、极紫外光刻(EUVL)<sup>[3-4]</sup>、X光光刻等一系列发展,光源的波长不断缩短,光刻工艺<sup>[5]</sup>不断提高,可分辨极限线宽不断减小。从光刻分辨率、焦深、工艺以及掩模方法<sup>[6]</sup>和大规模工业生产等方面来权衡,极紫外光刻都具有突出的优势。表现在光刻工艺和光刻胶等可以沿用传统的光刻技术,不需要作特别大的改进;光刻分辨率可以达到30 nm技术节点以下,在光刻过程中还能够提供足够的焦深,确保产品的质量;光源与光刻机的配套可以满足大规模工业生产的需要。

极紫外(EUV)光源是极紫外光刻技术的源头。各种同步辐射源、激光等离子体(LPP)<sup>[7]</sup>和放电等离子体(DPP)产生的极紫外光仍然是光刻研究和生产等的主要光源。同步辐射源造价高,电子注入很麻烦,不适用于大规模工业生产。激光等离子体先将电能转化为激光的能量,再转换成等离子体光源,能量经过三次转换,其效率较低;放电等离子体直接将电能转换为等离子体光源,能量转换效率较高。毛细管放电<sup>[8]</sup>作为四种气体放电方式(Z箍缩、中空阴极等离子体、等离子体焦点和毛细管放电)之一,近20年来已广泛应用于软X光激光<sup>[9-11]</sup>、等离子体波导和EUVL光源研究等。波长很短的极紫外光透射性能很强,极易透射普通材料,Mo/Si多层反射镜对13.5 nm的极紫外光具有最大值接近70%的反射率,适宜充当反射镜材料<sup>[12]</sup>,因此,13.5 nm的极紫外光被选用为曝光波长<sup>[13-14]</sup>。尽管毛细管放电极紫外光源的能量转换效率较高,但由于在波长13.5 nm附近2%谱带范围内的可用功率很低,毛细管放电装置不得不采用高重频放电的方式来满足曝光的光功率要求,结果导致一方面对紧随光源的光刻承台和曝光系统等稳定性提出了更苛刻的要求,另一方面高重频工作产生的大量放电碎屑如何及时清理也是不容忽视的难题。高温的杂质离子碎屑不仅充当无用的等离子体辐射源,对光源收集系统产生影响,而且冷却后可能吸收有用的极紫外光,降低了光源的输出功率。为了解决光源单次放电等离子体辐射有用功率不足而依赖高重频放电的问题,本课题组设计了毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源,旨在提高单次放电输出有用光功率的基础上,极大地降低放电的重复频率并有效地减少放电碎屑的产生。基于前期的工作,探讨激光在毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源形成中所起的作用。

## 2 毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源的原理

在毛细管放电软X光激光以及等离子体波导研究中,高温高密度等离子体不仅要达到数十甚至上百电子伏特等条件,而且其温度和密度分布沿毛细管轴向必须具有足够的稳定性、均匀性、对称性和轴向一致性。由于等离子体作为激光的增益介质或短波长光束的传输媒质,该良好状态必须维持足够的弛豫时间。因此,毛细管采用耐高温的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷材料,长度一般在十几或数十厘米,而内径仅有1.5~3 mm,内充十几到数百帕的工作气体。等离子体良好的状态既能确保输出的光源是稳态或准稳态的相干光,也可保证短波长的相干光束沿毛细管轴芯波导顺利传输。与毛细管放电软X光激光或等离子体波导不同,毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源产生非相干的瞬态光,一方面等离子体温度仅需达到20~50 eV,密度需达到约10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>;另一方面等离子体的高温高密度状态只要瞬间达到,并不需要维持较长的弛豫时间。因此,毛细管采用耐高温的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷材料,长度一般为5~30 mm,内径为10~50 mm,放电距离在5~30 mm范围内调节,内充十几到数百帕的工作气体。

毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源的概念设计早已被提出<sup>[15]</sup>。三束等离子体在毛细管内耦合的基本原理如图1所示。在洛伦兹力和外加激光等离子体的作用下,三束等离子体的形状逐步发生变化。从毛细管端面看,等离子体的演化过程如图1(a)~(e)所示。三对电极同时放电时,毛细管内的工作气体被电离成等离子体,此时放电电路导通,等离子体是电的良导体,由于电流的趋肤效应,电流基本上沿等离子体表面流过,三束等离子体受强大洛伦兹力的作用开始自箍缩,等离子体基本上呈圆形。在自箍缩的同时,任意一束等离子体受另外两束等离子体洛伦兹力的作用,逐渐向毛细管轴心运动,如图1(a)所示。随着电流的增大,三束等离子体逐渐向轴心接近,流经等离子体的表面电流密度也会重新分布,表现为外密内疏,等离子体靠外的表面受到强烈箍缩,而靠近内侧的表面箍缩较弱,由此引起等离子体不仅自身体积逐渐缩小,而且形状也慢慢发生变化,如图1(b)所示。伴随着箍缩过程的进行,等离子体的形变不断加大,向轴心的运动进

一步加快,三束等离子体的外边缘开始相互接触,等离子体逐渐融为一体,如图1(c)所示,此时电流基本沿等离子体的外包络面流动,只有在接触不严密的地方,内表面才有少量的电流分布。随着箍缩过程的进行,等离子体的体积逐渐缩小,不均匀的包络面电流使等离子体外表面的凸出部分因电流密度分布较大而箍缩强烈,较平坦的部分箍缩较弱,包络面逐渐变得平滑,而内表面因没有电流分布,基本上不再受到箍缩,这样逐渐演化成一个内空的小环带柱,此时利用外部激光束聚焦到等离子体的中心,在小环带柱的内空处产生外加的柱状激光等离子体,对外膨胀放电等离子体,如图1(d)所示。随着电流的逐步增大,箍缩作用加剧,等离子体环带柱进一步电离、加热,温度升高,体积减小,密度增大,同时外加的柱状激光等离子体向外膨胀挤压放电等离子体,在“外箍内膨”的作用下,放电等离子体将达到所需的高温高密度条件,瞬时辐射出强烈的极紫外光,如图1(e)所示。

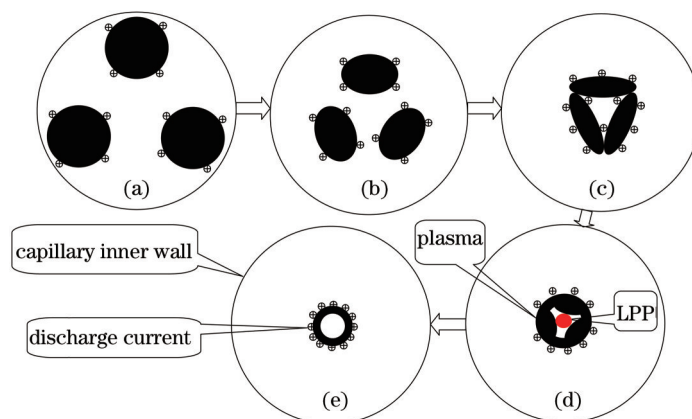


图1 三束等离子体在毛细管内耦合的基本原理

Fig.1 Basic principle of three plasmas coupled in capillary discharge

基于上述原理,假设工作气体的初始密度为  $1.37 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ ,三束等离子体之间的初始横向距离为 5 mm,等离子体长度为 10 mm,单束等离子体的放电电流峰值为 20 kA,电流上升沿 100 ns。利用这些数据模拟了三束等离子体与毛细管轴的距离随时间的演化以及三束等离子体所受洛伦兹力随时间的变化,结果如图2所示。从图中可见,三束等离子体离毛细管轴的距离在初始阶段随时间慢慢减小,此时放电电流较小,三束等离子体所受的洛伦兹力也较小;随着放电电流的快速上升,所受的洛伦兹力随时间快速增大,导致其加速向毛细管轴运动,离轴距离快速减小;三束等离子体到达毛细管轴的时间不到 35 ns,从 5 ns 时开始受到洛伦兹力,到 30 ns 时受力已超过 250 N。根据极紫外辐射的等离子体条件,洛伦兹力下限为 100~250 N(对应电子温度 20~50 eV),以最佳电子温度 30 eV 计算,洛伦兹力下限约为 150 N,从图2可见,三束等离子体的箍缩时间在 25~30 ns 之间。这些结果可以定性反映三束等离子体的运动和受力情况。

利用上述结果,计算了等离子体的箍缩半径和发光面积的放大因子随放电电流的变化,结果如图3所示。等离子体的箍缩半径是指在不同电流下,要达到极紫外辐射的条件,等离子体必须被箍缩到的程度;等

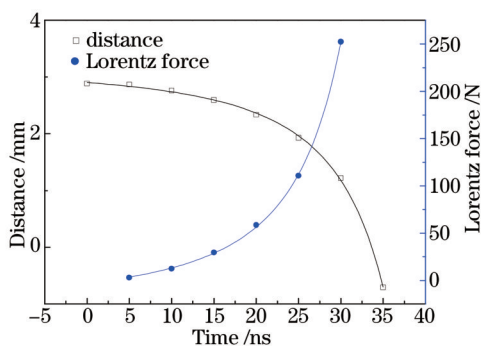


图2 等离子体离轴距离与所受洛伦兹力随时间的变化

Fig.2 Distance from axis and Lorentz force received versus time

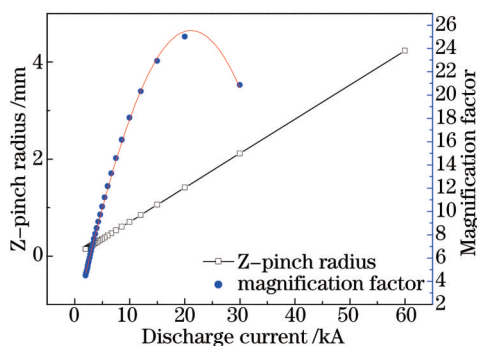


图3 箍缩半径与放大因子与放电电流的关系

Fig.3 Z-pinch radius and magnification factor as a function of discharge current



离子体发光面积的放大因子是指放电电流被分为多等份,形成多束等离子体,经耦合成为一个等离子体环带后,达到极紫外辐射条件时的发光面积与原放电电流所产生等离子体达到相同条件的发光面积之比。从图中可见,随着放电电流从60 kA逐渐减小,要达到极紫外辐射的条件,等离子体的箍缩半径线性减小,这是对单束等离子体而言的。60 kA的电流可以平均分成多等份,两股30 kA的电流理论上的放大因子可以达到21,三股20 kA的电流接近25,随着电流的分割等份增加,放大因子逐渐减小,最大值在2.5等份附近,实际上这不太可能实现,两等份即30 kA的位置也无法形成等离子体环带光源,故实验研究至少应从三等份即20 kA的位置开始,工业化生产的耦合光源可以考虑六等份即10 kA的位置,这样单束等离子体的电流不是太大,放大因子也不是太小,光源的耦合更容易实现,稳定性更好。

### 3 毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源演示装置

毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源演示装置如图4所示,主要包括电源、放电室、放电与激光触发同步器和真空控制柜等。电源为毛细管端面的三个电极提供直流高压,击穿管内的工作气体,产生三束等离子体;放电室内安装有毛细管,内充工作气体,三束等离子体在外加激光等离子体的作用下,耦合等离子体环带光源;放电与激光触发同步器控制放电与激光的触发,在三对阴、阳极同时放电时,同步触发激光器,促使三束等离子体在箍缩过程中受到激光等离子体的作用;真空控制柜主要调节并维持放电室内的气压,满足放电要求。

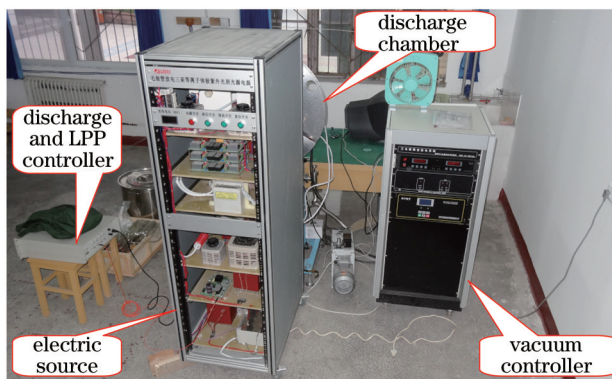


图4 毛细管放电 EUVL 耦合光源演示装置

Fig.4 Demonstrative setup of coupled EUVL source in capillary discharge

### 4 激光对毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源的作用

毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源演示装置建立后,首先应确保三对电极同时放电;其次要解决放电与激光触发的同步性问题;最后研究三束等离子体的耦合问题。

#### 4.1 三对电极同时放电

放电室内充入50 Pa的 $N_2$ ,阳极与阴极相对安装,阳极对阴极的放电距离8 mm。为了观测是否同时放电,将三个阳极之间的间隔增大到10 mm,三束等离子体之间由于横向距离较远,相互之间的洛伦兹力不足以将三束等离子体箍缩到毛细管轴心,这样便于观测三束独立的等离子体是否同时产生。单束等离子体承载的电流峰值为17 kA,电流上升沿100 ns。毛细管放电室开有3个观察窗,左边的观察窗安装一部光功率计;正中间观察窗安装一部彩色数字摄像机,每帧图的曝光时间为1/30 s,可以调焦到毛细管的端面或内部;右边的观察窗安装一部黑白 CCD 相机,每帧图的曝光时间为30 ms,不能调焦到毛细管的端面或内部。

彩色数字摄像机和黑白 CCD 拍摄的单束等离子体和三束等离子体如图5所示。其中图5(a)是摄像机拍摄的单束等离子体图像,从图像中可见3个电极支座;图5(b)是 CCD 拍摄的单束等离子体图像,无法看清电极支座和等离子体细节。单束等离子体是左边的一对电极放电产生的,其发光时使毛细管端面轮廓的左侧清晰而右侧模糊,图5(a)与(b)可以相互印证。图5(c)是摄像机拍摄的三束等离子体图像,图5(d)是 CCD 拍摄的三束等离子体图像。从图5中可见,三束等离子体发光极强,强烈的光源遮挡了电极支座,无法看到毛细

管端面的轮廓,但从图 6(a)中三束等离子体的演化过程可大致看出三束独立的等离子体几乎是同时发光同时变弱的。由于一方面放电室正中间的观察窗未完全正对毛细管轴线,引起摄像机镜头偏离毛细管轴线方向,另一方面制作放电室的不锈钢材料对摄像机镜头产生反光,这样同时放电的三束等离子体看起来强弱不均。此外,电极支座对摄像机的影响以及摄像机本身的时间响应不够都导致图 6(a)中的图像较模糊,但调焦到毛细管内部的摄像机还是能够隐约观测到三束等离子体的轮廓。然而,仅凭图像无法判断三束等离子体是否同时发光,后面将利用光功率计对此进行量化和比较。图 6(b)也反映了三束等离子体发光后由强变弱的情况,最后一幅图表明当光强较弱时,毛细管端面轮廓清晰,这说明三束等离子体基本上是同时发光同时变弱的,放电的同步性较好。如果不同时放电,必有一对电极最后放电,导致毛细管端面轮廓最终出现图 5(b)所示的现象。

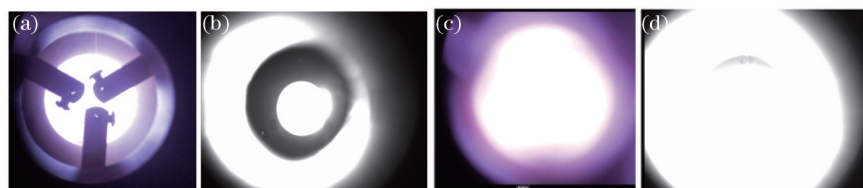


图 5 (a)彩色摄像机和(b)黑白 CCD 拍摄的单束等离子体; (c)相同摄像机和(d)相同 CCD 拍摄的三束等离子体  
Fig.5 Single plasma taken by (a) a color digital camera, (b) a black-white CCD; Three plasmas taken by (c) the same camera and (d) the same CCD

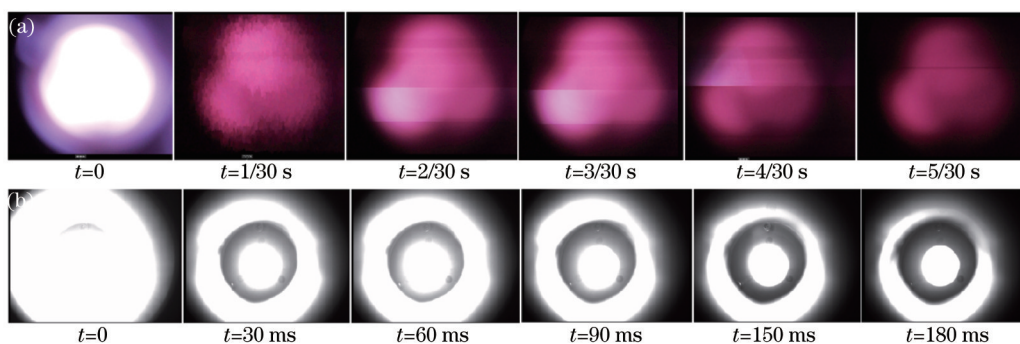


图 6 拍摄的三束等离子体的演化过程。(a) 摄像机拍摄; (b) CCD 拍摄  
Fig.6 Evolution of three plasmas taken by (a) Camera and (b) CCD

#### 4.2 放电与激光触发的同步性

图 4 中放电与激光触发同步器有 4 个电信号和对应的 4 个光信号输出通道,实验中利用 4 个光信号通道中的第二和第三通道,第二通道控制放电触发,第三通道控制激光触发。由于辐射极紫外光的等离子体一般都处于高温高密度状态,短波长的激光容易透射放电等离子体区域,不利于激光等离子体的产生,因此在耦合光源的研究中将利用 Nd:YAG 激光器输出波长为  $1.064 \mu\text{m}$  的激光,脉宽在  $40 \mu\text{s}$  左右,能量可达  $150 \text{ mJ}$ 。激光器既可以单次外触发工作,也能够低重复频率(1、3、5、10 Hz)自动内触发工作。放电与激光信号如图 7 所示,黄色信号表示 3 束等离子体同时发光后的弛豫过程,蓝色尖峰信号表示激光的触发过程。其中图 7(a)表示激光落后放电;图 7(b)表示激光与放电同步;图 7(c)表示激光超前放电。按照前面的通道控制方式,无论将第三通道相对第二通道的延时调节到多少,激光总是落后放电,当延时调节到  $40 \text{ ns}$  时,激光最靠近放电触发,相差  $248 \mu\text{s}$ ,任何其他延时都不能使它们同步,激光与放电触发相差更远。改变通道控制方

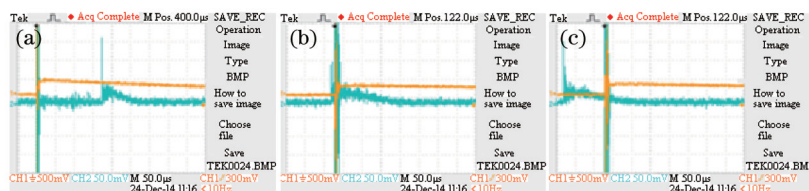


图 7 放电与激光信号。(a) 激光落后放电; (b) 激光与放电同步; (c) 激光超前放电  
Fig.7 Signal of discharge and laser. (a) Laser behind discharge; (b) synchronization of laser and discharge; (c) laser before discharge

式,利用第二通道控制激光触发,第三通道控制放电触发,当第三通道相对第二通道的延时调节到 60 ns 时,激光与放电触发完全同步,如图 7(b)所示;当延时调节到 70 ns 时,激光超前放电触发 110  $\mu$ s,如图 7(c)所示。反复试验,结果十分稳定,这表明在一定的控制条件下,能够实现放电与激光触发的同步性。

### 4.3 三束等离子体的耦合

毛细管放电室的左侧观察窗安装了一部光功率计,可以监测等离子体发光的功率。在放电达到稳定的情况下,随机连续测量十次单束等离子体的光功率,数据分别为 63.8、71、70、71.9、63、60、66、63、64、76 pA,平均值为 66.87 pA;随机连续测量十次二束等离子体的光功率,数据分别为 146、118、147、145、131、120、132、131、116、113 pA,平均值为 129.9 pA;随机连续测量十次三束等离子体的光功率,数据分别为 201、298、320、319、333、269、353、119、162、301 pA,平均值为 267.5 pA。从这些数据发现,单束等离子体发光比较稳定,平均值的三倍为 200.61 pA,在三束等离子体的 10 个数据中,只有 119 pA 和 162 pA 小于该值,其中 5 个值超过 300 pA,最大值达到了 353 pA,这说明十次放电中仅有两次不能使三对电极同时放电,剩下的八次是同时放电的,可见演示装置基本上能够满足同时放电的要求。光功率计的数据再次证明图 5(c)和(d)以及图 6(a)和(b)是同时放电产生的。

从三束等离子体放电的平均光功率 267.5 pA 和单束等离子体的 200.61 pA 来看,光源有效发光面积的放大因子约 1.33。与约 25 的最大理论值相比,三对电极同时放电时三束等离子体发生了部分耦合,这种耦合是由于电极之间合适的位置所引起的,称为位置耦合。实验中没有激光的参与,不可能发生动力耦合。

### 4.4 激光对耦合光源的作用

上述实验主要研究三对电极放电的同时性,放电与激光触发的同步性。从实验结果可见,已完全达到了预期的效果。由于实验目的所限,3 个阳极或阴极之间的间隔较大,三束等离子体的横向距离较远,相互之间所受的洛伦兹力很小,尽管三束等离子体向毛细管轴心箍缩,但它们之间留下的沿轴空隙太大,激光沿毛细管轴心穿过,没有发挥产生激光等离子体的作用,此时不可能发生动力箍缩。如果调节到合适的间隔,三束等离子体一方面可以最大限度地实现位置耦合,另一方面可以利用激光等离子体向外膨胀、挤压放电等离子体,在洛伦兹力的箍缩和激光等离子体的热膨胀作用下,三束等离子体最终将耦合成较大面积的极紫外发光体。如果间隔调节到太小,在强大洛伦兹力的作用下,三束等离子体将很快箍缩成一束等离子体,激光到达该束高温高密度等离子体时,由于 1.064  $\mu$ m 的波长较长,不能透过该等离子体区,只能反射回来,无法产生激光等离子体。即使能够沿毛细管轴线产生柱状激光等离子体,因处于放电等离子体之外,也无法发挥热膨胀、挤压的作用,位置耦合与动力耦合都不能发生。受电极支座的影响,3 个阳极和 3 个阴极都不能调节到很小间隔,因此,三束等离子体在不同间隔的实验结果无法判断,新的电极支座正在重新加工,可以在更大范围内调节间隔,以便进行位置耦合与动力耦合的研究。

## 5 结 论

在毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源研究中,激光对耦合光源的形成具有十分重要的作用。在实现三对电极的同时放电以及放电与激光同步触发的基础上,分析了激光等离子体对毛细管放电三束等离子体极紫外耦合光源所起的作用。实验中已经观测到了三束等离子体因电极间隔适当布局所引起的位置耦合,由于缺少激光等离子体所产生的动力耦合作用,与理论值相比,位置耦合的效果十分有限。

### 参 考 文 献

- 1 Nobuji Matsumura, Norihiko Sugie, Kentaro Goto, *et al.*. Process development for high scan ArF immersion lithography[C]. SPIE, 2008, 6923: 69230D.
- 2 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Design of wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616002.  
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 用于 ArF 光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0616002.
- 3 Nardello M, Zuppella Paola, Polito V, *et al.*. Stability of EUV multilayer coatings to low energy alpha particles bombardment[J]. Opt Express, 2013, 21(23): 28334–28343.



- 4 Bayraktar Muharrem, Van Goor Fred A, Boller Klaus J, *et al.*. Spectral purification and infrared light recycling in extreme ultraviolet lithography sources[J]. *Opt Express*, 2014, 22(7): 8633-8639.
- 5 Zhu Jiangping, Hu Song, Yu Junsheng, *et al.*. Calibration method for mask grating mark imaging in lithography alignment[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0108002.  
朱江平, 胡 松, 于军胜, 等. 光刻对准中掩模光栅标记成像标定方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0108002.
- 6 Xiao Yanfen, Zhu Jing, Yang Baoxi, *et al.*. Design of micro-cylindrical-lens array used for illumination uniformization in lithography systems[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0216001.  
肖艳芬, 朱 菁, 杨宝喜, 等. 用于光刻机照明均匀化的微柱面镜阵列设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0216001.
- 7 Zhang Xingqiang, Lu Jianye. Preliminary analysis of laser sustained plasma propulsion mechanism[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0802008.  
张兴强, 鲁建业. 激光等离子体推进机理的初步分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0802008.
- 8 J J Rocca, D C Beethe, M C Marconi. Progress for soft-x-ray and XUV lasers in capillary discharges[J]. *Opt Lett*, 1988, 13(7): 565-567.
- 9 J J Rocca, V Shlyaptsev, F G Tomasel, *et al.*. Demonstration of a discharge pumped table-top soft X-ray laser[J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73(16): 2192-2195.
- 10 X Q Zhang, Y L Chen, Q Wang. Characteristics of a Ne-like Ar 46.9 nm soft X-ray laser in capillary discharge at a low Ar pressure [J]. *Laser Physics*, 2008, 18(8): 958-961.
- 11 Zhang Xingqiang, Chen Yuanli, Wang Qi, *et al.*. Impact of modified main-switch on capillary discharge soft X-ray laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(2): 324-327.  
张兴强, 程元丽, 王 骐, 等. 主开关改进对毛细管放电软 X 光激光的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 324-327.
- 12 Trost Marcus, Schröder Sven, Duparré Angela, *et al.*. Structured Mo/Si multilayers for IR-suppression in laser-produced EUV light sources[J]. *Opt Express*, 2013, 21(23): 27852-27864.
- 13 M A Klosner, H A Bender, W T Silfvast. Intense plasma discharge source at 13.5 nm for extreme-ultraviolet lithography[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(1): 34-36.
- 14 T Boboc, R Bischoff, H Langhoff. Emission in the extreme ultraviolet by xenon excited in a capillary discharge[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2001, 34(16): 2512-2515.
- 15 Zhang Xingqiang, Cheng Yuanli, Wang Qi. Concept design of three-line capillary: Possible source for extreme ultraviolet lithography [J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(s1): 81-84.  
张兴强, 程元丽, 王 骐. 可用于极紫外光刻的三线毛细管的概念设计[J]. *中国激光*, 2008, 35(s1): 81-84.

栏目编辑: 宋梅梅