

可用于极紫外光刻的三线毛细管的概念设计

张兴强 程元丽 王 骥

(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 极紫外光刻(EUVL)技术是目前 193 nm 浸没式光刻技术的延伸,有望突破 30 nm 或更小技术节点而成为下一代光刻(NGL)技术的主流。毛细管放电极紫外(EUV)光源可为极紫外光刻研究提供高效、便捷的光刻源头,但光源的辐射功率较低一直制约着极紫外光刻技术的发展。三线毛细管放电极紫外光源的概念设计与常用毛细管装置有着本质的区别,它们不同的工作机制将使三线毛细管放电产生的环带状等离子体极紫外光源的辐射功率明显高于常用毛细管的情形,最佳收集角也得到相应的提高。三线毛细管概念设计方案的提出不仅从技术上开拓出一片全新的领地,为极紫外光刻研究提供所需的光源,而且从效益上看更适合于大规模工业生产。

关键词 极紫外光刻; 极紫外; 毛细管放电; 三线毛细管

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A

Concept Design of Three-Line Capillary: Possible Source for Extreme Ultraviolet Lithography

Zhang Xingqiang Cheng Yuanli Wang Qi

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

Abstract Extreme ultraviolet lithography (EUVL) technology, the extensional technology of 193 nm immersion lithography, would breakthrough the 30 nm node or below and become the main technology of the next generation lithography (NGL). Although the capillary discharge extreme ultraviolet (EUV) source could provide efficient and convenient light for EUVL investigation, its low power confines the development of EUVL. The concept design of three-line capillary discharge EUV source will be essentially different from conventional capillary discharge channel, which will also make a great difference of dynamical mechanism. The circular loop band plasma column of three-line capillary discharge EUV source irradiates more EUV power than conventional capillary discharge device does and the optimal divergence angle of the former will be improved too. The concept design plan of three-line capillary discharge will not only create a new area for EUVL research technically, but also help to produce light sources industrially and economically.

Key words extreme ultraviolet lithography; extreme ultraviolet; capillary discharge; three-line capillary channel

1 引 言

电子工业的发展,特别是大规模集成电路制造工艺对不断缩小的可分辨最小特征线宽的苛刻要求,加快了人们不断寻求新的光刻技术的步伐。光刻技术也由最初的微米级刻线进入到纳米级刻线的水平。目前,193 nm ArF 光刻是量产 65~100 nm 芯片的主

流技术,英特尔甚至采用这一技术量产 45 nm 芯片,而大多数公司已改用 193 nm ArF 浸没式光刻量产 45 nm 芯片。由于 193 nm 浸没式光刻比干法光刻具有更高的分辨率,采用 193 nm 浸没式光刻延伸到 32 nm 节点已成必然。由于波长的缘故,要想采用 193 nm 浸没式光刻突破 30 nm 甚至更小的节点

基金项目: 国家 863 计划(2002AA84ts23)、国家自然科学基金(60038010)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 张兴强(1969—),男,湖北人,博士研究生,主要从事毛细管放电软 X 光激光和毛细管放电 Z 箍缩极紫外光刻光源等方面的研究。E-mail: zhangxingqiang_student@sina.com

导师简介: 王 骥(1942—),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事短波长激光、X 光激光及激光空间信息技术等方面的研究。E-mail: qiawang@hope.hit.edu.cn

显得十分困难。根据瑞利法则和焦深公式,在满足焦深要求的条件下,要想获得更细的可分辨特征线宽,理想的办法是缩短曝光波长至极紫外(EUV)波段。因此,极紫外光刻(EUVL)技术取代深紫外光刻(DUVL)而成为下一代光刻(NGL)^[1]技术的理想候选。由于大多数光学材料对极紫外光存在强烈的吸收,极紫外辐射的利用效率非常低,另外光学器件吸收极紫外辐射后的散热以及由此引起的变形甚至损坏也是难以回避的问题。钼硅多层反射镜对13.5 nm的极紫外光有高达40%~70%的反射率,这一波长的极紫外光无疑成为极紫外光刻比较理想的光源。

激光诱导等离子体(LPP)极紫外光源和气体放电等离子体(DPP)极紫外光源是两种主要的极紫外产生方式,有时为了提高输出功率或其他原因可能采用几种方式的组合。激光诱导等离子体方式可以采用较大的光源收集角,从而有较高的收集效率,但由于光源本身的大小、能量转换方式、辐射功率以及吸收等原因,中间焦点处(IF点)的光功率并不大。近年的实验数据显示,气体放电等离子体极紫外光源在13.5 nm附近(2%带宽)的输出功率达到了25 W(Xe,收集角1.8 sr,IF点,转换效率1%)和50 W(Sn,收集角1.8 sr,IF点,转换效率2%,源点功率800 W/2 π sr),技术上可突破1000 W/2 π sr(IF点大于200 W),满足对极紫外光源输出的要求^[2]。气体放电等离子体光源输出功率主要面临转换效率、发射谱优化和电极的热载荷等问题。尽管还未达到115 W(IF点)的量产功率,但这些成就标志着13.5 nm辐射用于极紫外光刻量产的目标越来越近^[3]。气体放电等离子体方式直接将电能转换成等离子体内能,能量转换效率高。毛细管放电是四种气体放电方式(等离子体聚焦、中空阴极等离子体、Z-箍缩、毛细管放电)之一,利用毛细管放电抽运已经实现了软X光激光输出^[4]。尽管毛细管放电极紫外光源有着突出的优势,可以作为极紫外光刻技术的理想候选,但也存在一些不足:1)光源在13.5 nm附近的辐射功率太低,从而使IF点的聚焦功率无法满足光刻的需要;2)毛细管的几何结构限制了光源的收集角;3)毛细管放电过程中电极和管壁产生的碎屑对收集系统的污染以及对13.5 nm辐射的吸收都会影响到极紫外辐射的有效输出。要满足大规模工业生产的要求,除了从收集角和工作

重复频率等方面来提高光源的利用效率或增加曝光能量外,最根本的办法还是靠大幅度提高光源的输出功率。收集角有个最佳值,较大或较小的收集角都会降低收集效率;重复频率太高会增大生产过程中的废品率,造成生产成本的提高。三线毛细管概念设计方案的提出正是针对这一问题,它不仅大幅度地提高极紫外光源的输出功率,而且可相应地扩大最佳收集角,从而解决EUVL技术中的照明问题。本实验室长期从事毛细管放电短波长光源研究,自2004年实现毛细管放电软X光激光以来,不断进行装置改进^[5]和实验研究^[6],凭借专业的理论知识和丰富的实践经验,原创性地提出了三线毛细管放电高功率极紫外光源概念设计方案,准备探索性地开展三线毛细管放电极紫外光刻光源的研究。

2 三线毛细管的概念设计

毛细管放电是指在直径为毫米量级、长度为十几到几十厘米量级的绝缘管两端加上快脉冲高电压,在高电压的作用下,首先在毛细管壁发生沿面闪络,导致毛细管中形成等离子体放电通道,在强大放电电流产生的强磁场的作用下,等离子体自身产生Z箍缩效应,最终形成积聚于毛细管芯的轴向、均匀的高温高密度等离子体区,其中的电子碰撞或三体复合过程导致相应能级的粒子数反转和受激辐射。

三线毛细管的概念设计与常用毛细管存在很大的差别。常用毛细管的两端装有一对阴极和阳极,工作时加电压于管的两端,击穿工质,最终形成积聚于毛细管芯的细长等离子体柱。概念设计的三线毛细管两端装有三对阴极和阳极,工作时在毛细管中产生三束等离子体,这三束等离子体处于毛细管轴芯的外围,管芯的预膨胀等离子体按照不同的产生方式有三种不同的设计:1)预膨胀等离子体若采用激光诱导等离子体方式,在毛细管芯处要安装锡制靶心,高能激光聚焦到靶心上产生膨胀的等离子体;2)若采用气体放电等离子体方式,除了产生三束等离子体的三对电极外,还需要增加一对附加电极;3)若采用爆炸金属丝方式(不排除采用冷冻丝),在毛细管的管芯处需要放置一根非常细的锡丝,爆炸的锡丝产生膨胀的等离子体。不管采用哪种方式,其中必然存在一些需要解决的难题。图1是三种不同方式产生预膨胀等离子体的三线毛细管概念设计示意图。

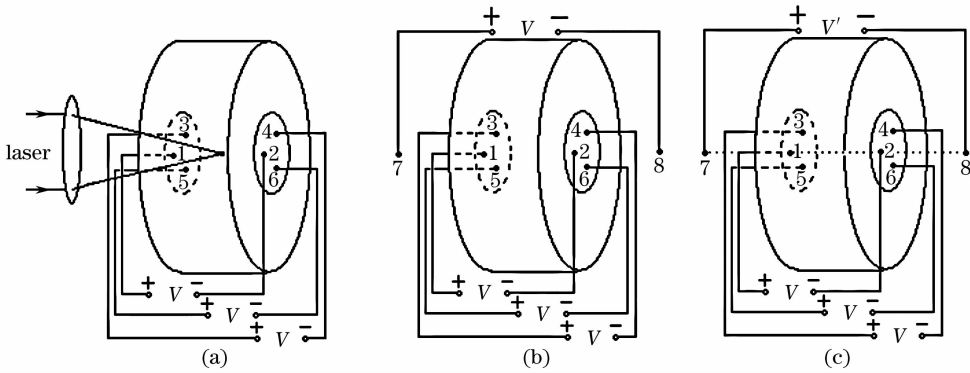


图1 三线毛细管概念设计。(a) 激光诱导等离子体预膨胀方式, (b) 气体放电等离子体预膨胀方式, (c) 爆炸锡丝方式
Fig. 1 Concept design of three-line capillary. (a) LPP induced type, (b) DPP induced type, (c) Sn silk exploding type

3 三线毛细管的工作机制

常用毛细管与三线毛细管构造的差异决定了它们具有不同的工作机制,三线毛细管的受力方式和等离子体终态与常用毛细管有着本质的区别。从受力方式上看:常用毛细管采用同体受力方式,带电等离子体受洛仑兹力作用向毛细管轴心箍缩,来自等离子体自身的热压力抵抗洛仑兹力的作用,直到二力平衡,此时,高温高密度等离子体发出极紫外辐射,洛仑兹力和热压力都来自等离子体本身。三线毛细管采用异体受力方式,图2是三线毛细管放电等离子体的形成过程。三线毛细管产生的三束等离子体受自身磁场的洛仑兹力作用自箍缩,同时受其他等离子体磁场的洛仑兹力作用向毛细管轴芯箍缩。三束等离子体柱在分别形成的过程中,彼此之间存在相互作用,除了各自独立地箍缩到三个对称而分开的柱芯外,还同时向毛细管芯箍缩,形成以三个等离子体柱芯为支撑的等离子体环带,如图2(a)所示,热压力来自于轴芯产生的预电离等离子体的热膨胀。由此可以看出,辐射极紫外的三束等离子体所受的洛仑兹力来自等离子体本身或邻近等离子体,把三束等离子体形成的环带看成一个整体,洛仑兹力[如图2(a)所示指向轴芯的四个小箭头]来自等离子体自身,而热压力[如图2(a)所示从轴芯指向外的四个小箭头]来自轴芯处的预电离的膨胀等离子体,并非辐射等离子体本身。从形成的终态等离子体形状来看:常用毛细管形成一束细长的辐射等离子体柱;三线毛细管在放电过程中受到洛仑兹力作用向轴芯箍缩,随着箍缩过程的进行,三束等离子体相互作用形成的等离子体包络环逐渐缩小,由于毛细管轴芯处存在预膨胀的等离子体,等离子体包络环最终形成成为环带状辐射等离子体柱,从毛细

管端面可见等离子体辐射环带,如图2(b)所示,环带状等离子体辐射区域将会明显大于常用毛细管的情形。

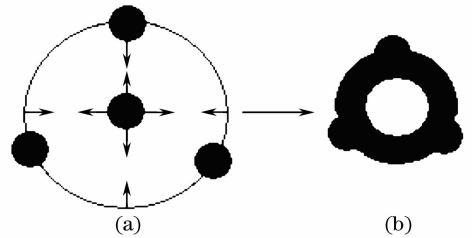


图2 三线毛细管放电时等离子体的形成
Fig. 2 Formation of plasma in three-line capillary discharge

4 三线毛细管研究的意义

毛细管放电极紫外光源有很多突出的优势,但要将它付诸于大规模工业生产,致命的弱点是光源的输出功率太低。从技术上来看,对于常用毛细管,扩大光束收集角是一个较合理的办法,但对任何毛细管而言光束收集角有个最佳值,超过这个最佳值,再大的收集角只会降低光源的收集效率。三线毛细管部分地弥补了这一不足,在相同的条件下,三线毛细管可有效地增大最佳收集角,如图3所示,中心虚线是常用毛细管在管芯形成的等离子体柱,轴芯两

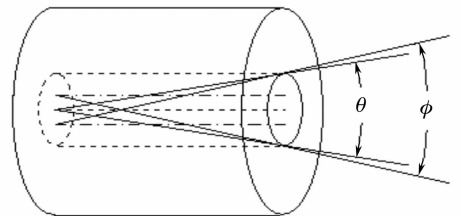


图3 毛细管放电极紫外光源收集角示意图
Fig. 3 Schematic diagram of collecting angle of capillary discharge EUV source

侧的两条点划线是三线毛细管形成的环带状等离子体包络柱的外边界,角 θ 是常用毛细管的最佳收集角,角 ϕ 是三线毛细管的最佳收集角,从图中可以清楚地看出 $\theta < \phi$ 。由于三线毛细管形成的是环带状等离子体包络柱,其发光面积明显大于常用毛细管所产生的细丝状等离子体柱的情形,三线毛细管所产生的等离子体的辐射功率也将得到显著提高,在所需曝光面积较小的情况下,甚至可以采用端面直接照明的方式。

从效益上来看,三线毛细管不但有效提高了单次工作的光源输出功率,而且增大了最佳收集角,从而可以降低光刻曝光的工作重复频率,减少高重复频率工作时因为环境中可能存在的气流湍动、各种振动、温度效应以及光学元器件、掩模板、光刻材料等的热效应形变而产生的废品率,重复频率的降低也意味着单品的加工时间缩短,劳动生产率大幅度提高,这样从经济效益上为厂家节省了成本,提高了合格产品的产量。

从战略上来看,三线毛细管的构造和工作机制与常用毛细管存在很大的差别,它产生的三束等离子体除了自身箍缩外,还存在相互作用,所形成的等离子体包络环与轴心的预膨胀等离子体也存在相互作用。三线毛细管既有别于金属丝阵,又不同于金属箔筒,与爆炸冻丝也有很大区别。三线毛细管产生的等离子体是带电磁流体,并且三束带电磁流体之间相互作用,最终形成包络状的等离子体辐射柱。三线毛细管气体放电在技术、工艺甚至基本理论上还存在很多急需解决的难题。

5 结 论

毛细管放电紫外光源是极紫外光刻技术的研究重点之一。三线毛细管放电紫外光源的概念设计虽然是极紫外光刻光源研究的一条可选方案,但目前无人提出该方面的研究方案或计划,我国应提前着手,将三线毛细管放电紫外光源研究纳入预

研的轨道。

三线毛细管放电紫外光源的预研将进一步带动六线甚至多线毛细管的研究。三线毛细管研究过程中将会出现很多难题,如毛细管两端三对电极之间的放电控制(特别是爆炸锡丝方式中如何排除金属丝对电极放电的干扰),附加电极预电离等离子体的断流膨胀与三对电极放电之间的延时,三束等离子体之间的对称箍缩,预膨胀等离子体与辐射等离子体之间的不稳定性互扰,终态环带状等离子体柱的稳定性等,这些问题的解决需要制定必要的研究计划和共同合作方案。

致谢 感谢哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 X 光组全体成员提出三线毛细管概念设计方案。

参 考 文 献

- 1 Wen Shangming, Yuan Dafa, Tang Yong *et al.*. Prospect of the next generation lithography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(suppl.): 161~167
温尚明,袁大发,唐 勇等. 下一代光刻技术展望[J]. *光电工程*, 1999, **26**(增刊): 161~167
- 2 Vivek Bakshi, Rainer Lebert, Bernhard Jagle *et al.*. Status report on EUV source development and EVU source applications in EVUL[C]. *SPIE*, 2007, **6533**(15): 1~11
- 3 Takaharu Mitura, Katsuhiko Murakami, Kazuaki Suzuki *et al.*. Nikon EUVL development progress update[C]. *SPIE*, 2007, **6517**(7): 1~10
- 4 J. J. Rocca. Table-top soft X-ray lasers [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, **70**(10): 3799~3827
- 5 Zhao Yongpeng, Li Yan, Xie Yao *et al.*. Influence of the main-switch of the capillary discharge setup on soft X-ray laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1176~1180
赵永蓬,李 岩,谢 耀等. 毛细管放电装置主开关结构对产生软 X 射线光激光的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9): 1176~1180
- 6 Luan Bohan, Zhao Yongpeng, Cheng Yuanli *et al.*. Influence of the inherent pre-pulse of blumlein transmission line on soft X-ray laser pumped by capillary discharge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.): 163~165
栾伯哈,赵永蓬,程元丽等. 毛细管放电产生软 X 光激光的稳定输出[J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 163~165