

激光等离子体极紫外光刻光源

窦银萍, 孙长凯, 林景全*
(长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 研究并讨论了下一代光刻的核心技术之一——激光等离子体极紫外光刻光源。简要介绍了欧美和日本等国极紫外光刻技术的发展概况, 分析了新兴的下一代 13.5 nm 极紫外光刻光源的现状, 特别讨论了国内外激光等离子体极紫外光刻光源的现状, 指出目前其存在的主要问题是提高光源的转化效率和减少光源的碎屑。文中同时概述了 6. x nm (6.5 ~ 6.7 nm) 极紫外光刻光源的最新研究工作。最后, 介绍了作者所在研究小组近年来在极紫外光源和极紫外光刻掩模缺陷检测方面开展的研究工作。

关键词: 极紫外光刻; 激光等离子体; 极紫外光源; 转换效率

中图分类号: TN305.7; O539 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130601.0020

Laser-produced plasma light source for extreme ultraviolet lithography

DOU Yin-ping, SUN Chang-kai, LIN Jing-quan*
(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)
* Corresponding author, E-mail: linjingquan@cust.edu.cn

Abstract: Laser-produced Plasma (LPP) Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL) light source, one of the core technologies of next generation lithography, is discussed. A brief review to the development situation of lithography technology in Europe, America and Japan is given. Being a newly arisen research direction, the status of next generation 13.5 nm EUVL source is analyzed, and especially the research on EUVL source based upon LPP at home and abroad is described and analyzed in detail. It points out that the main problems for the EUVL are how to improve the conversion efficiency of EUV light and how to reduce the light debris. Furthermore, the latest research status on the EUVL source at 6.7 nm is also presented. Finally, it introduces the research work of the author's group on EUVL light sources and the detection of mask defect for EUVL.

Key words: Extreme Ultraviolet Lithography (EUVL); Laser-produced Plasma (LPP); Extreme Ultraviolet (EUV) source; Conversion Efficiency (CE)

收稿日期: 2012-10-11; 修订日期: 2012-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61178022); 吉林省科技厅资助项目 (No. 20111812)

1 引言

随着新世纪电子产业的迅猛发展,人们的生活正式地步入到电子化、智能化时代。各种电子产品对半导体芯片集成度的要求越来越高,而服务于现阶段芯片生产的紫外光刻技术已经无法满足集成度大幅提高的要求,人们不得不把目光投向下一代具有巨大潜力的极紫外光刻(Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL)技术。

EUVL 技术是深紫外光刻(Deep Ultraviolet lithography, DUVL)向更短波长的延伸,本质上与现有的光学光刻十分相似。芯片光刻技术经历了从最早由汞弧光灯发出的可见光波段(436 nm)和紫外光波段(365 nm),到准分子激光发出的深紫外光波段(248 nm)和(193 nm)的发展过程。随着生产技术的提高和实际市场的需求,要求半导体芯片在更小的尺寸上集成越来越多的功能,人们通过各种手段来扩展和改进现有的 EUVL 技术。目前,Intel 公司采用液体浸润式技术已经成功地把 193 nm 光刻技术应用于特征尺寸为 22 nm 的晶圆生产。但是,深紫外波段的光刻技术在物理层面上已经发展到了极限,所以,研究能够制造出更小工艺线宽的光刻技术迫在眉睫。

光刻技术在半导体晶圆中可刻划出的最小线宽 d 可表示为 $d = k\lambda/NA$, 其中 λ 为曝光波长, NA 为光学系统的数值孔径, k 是与生产工艺相关的技术常数, 可以看出最直接有效缩短线宽工艺的手段就是减小光刻中的曝光波长。目前,下一代光刻(Next-generation Lithography, NGL)技术方案有以下几种:(1)使用更短深紫外波长 157 nm 光刻;(2)使用极紫外波段 13.5 nm 光刻;(3)使用 X 射线波段 0.4 nm, 甚至使用更短波长的电子或离子束激光光刻。157 nm 深紫外光刻技术可以无缝衔接现有的 193 nm 光刻技术,但从它的波段位置看,若继续引入,则将面临再次升级的要求,因而,发展前景不容乐观;而更短波段的 X 射线和原子、离子束激光技术有很多要解决的理论和难题,发展还不成熟;所以,从现阶段的技术成熟度来看,极紫外 13.5 nm 光刻技术最有潜力

接替现有的 193 nm 光刻技术,它可大幅度提高芯片的生产工艺,推进特征尺寸进入 10 nm 甚至更短^[1]。

EUVL 概念的形成始于 1988 年。其后,美国、欧洲和日本等国家对其在基本理论、技术难点和投入工业生产等方面进行了大量的研究工作。国际著名公司(Intel, Cannon, Nikon, Hitachi, Samsung, Philip, ASML 和 Cymer 等),国立研究机构(美国 Lawrence Livermore, Lawrence Berkeley, Sandia; 日本产业技术综合研究所; 法国 CEA 等)以及许多知名的大学都投入了相当多的技术力量进行了 EUVL 技术的研究。美国 EUVL 技术起步阶段的研究是在能源部的 3 个实验室(Sandia 国家实验室(SNL)、Livermore 国家实验室(LLNL)、Berkley 国家实验室(LBNL))、AT&T 公司和部分大学主导下进行的。到 1997 年,Intel 公司成立了 AMD, Motorola, Micron, Infineon 和 IBM 的 EUV LLC 公司,并与由 LBNL, LLNL 和 SNL 组成的国家技术实验室(VNL)签订了 EUVL 联合研发协议(CRADA)。目前,美国共有包括国立实验室、大学、公司、集成电路公司和协调机构等超过 50 个单位参与了 EUVL 的研发工作。在欧洲,与 EUVL 相关的研究工作起步于 1996 年,主要项目有 4 个,约 110 个研究单位参与,其中比较重要的项目为 MEDEA 和 MORE MOORE。日本的 EUVL 研究工作开始于 1998 年,并于 2002 年 6 月成立了 EUVL 系统研究协会(EUVA),目的是加速日本公司的 EUVL 研发工作和有效地管理 EUVL 研发项目^[2]。

典型的 EUVL 系统主要由极紫外(EUV)光源、光辐射收集系统和投射曝光系统等部分组成。由于 EUV 光在介质中存在强烈吸收,使得原有的常规折射光学系统很难再应用于这个波段的光刻技术中, EUVL 的光学系统必须采用反射式设计,且需安置到真空腔室里。光辐射收集系统主要由两种不同元素原子间隔叠放组成的多层膜反射镜构成。投射曝光系统将收集到的极紫外光通过反射式的掩模携带要蚀刻的电路信息后,经过一系列缩放处理,最终投射到晶圆上进行曝光生产。

世界各国经过了大量的研发工作后,在紫外

光刻方面已经取得了重要的工作进展。目前, Intel、ASML 及 Nikon 公司都已分别研制出低产量的 EUVL 演示样机。

EUV 光源作为极紫外光刻机的重要组成部分,已经被国内外众多研究机构进行了广泛的研究。

2 光刻用激光等离子体极紫外光源

为了满足大规模工业生产的需要, EUVL 中光源部分的基本要求是:提供足够高的带内极紫外辐射功率;收集系统污染少,以保证整个系统的长时间稳定输出^[3]。

目前,获得 EUV 光源主要有 3 种途径:同步辐射源、放电等离子体(Discharged Produced Plasma, DPP)和激光等离子体(Laser Produced Plasma, LPP)。同步辐射源可将产生的高强度极紫外带内辐射用于光刻技术,相比于 DPP 和 LPP,同步辐射不需要周期性地替换关键部件或燃料靶材,对光学元件无碎屑(debris)污染问题,是一种优良的极紫外光源。但是,由于其体积庞大、装置复杂、造价成本昂贵、灵活性差等,限制了其应用到商业光刻生产上。

DPP 和 LPP 共同的特点是形成极高的温度环境,产生高温等离子体发射,从而辐射出高强度的极紫外光。因此,两者可以使用相同的燃料靶材,只是在形成的手段上有所区别。DPP 通过两个电极在高压下产生强烈的放电来产生高温高热的等离子体环境,而 LPP 则通过高功率的激光脉冲直接作用到靶材来产生高温等离子体环境,并向外发射极紫外辐射。其中, DPP 方法可以获得相当高强度的 EUV 辐射,增大放电电流的输入功率,提高 EUV 的辐射输出,但等离子体在产生过程中会自然地电极产生热负荷和腐蚀,造成关键元件部分的损坏,并伴随产生大量的碎屑,污染光学系统,很难维持长时间的稳定工作,到目前为止也没有找到很好的解决方案,因此,阻碍了 DPP 在 EUVL 中的应用。LPP 方法使用脉冲激光照射靶材,使其吸收高能量产生等离子体,相比 DPP 方式,光源具有更好的可控性和稳定性,不仅能够

有效减少设备热负荷,提高光源工作频率,而且能直接控制等离子体产生区域的尺寸和空间稳定性。虽然 LPP 也存在碎屑的污染问题,但较 DPP 光源要清洁很多。LPP 体积小、亮度高、可以通过选择适当的燃料靶材及控制等离子体参数来实现极紫外等离子体光源输出波长的调谐。由于其产生方式的灵活性,可在更大的立体角范围内收集 EUV 光(如图 1 所示),从而能更有效地利用产生的辐射提高输出功率。从多年来的发展来看, LPP 光源的巨大潜力不断被挖掘,最有希望能满足 EUVL 未来高量产的需求。

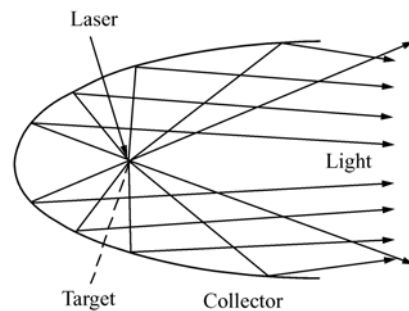


图 1 收集 LPP EUV 辐射示意图

Fig. 1 Framework of LPP EUV radiation collected

图 2 是 CYMER 公司生产的以 LPP 为基础的极紫外光源工业样机^[4]。整个系统包括:激光

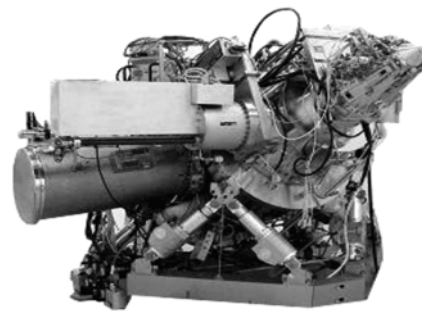


图 2 CYMER 公司生产的 LPP 源^[4]

Fig. 2 LPP source produced by CYMER company^[4]

器、光束传播系统(Beam Transport System, BTS)和光源放置器。驱动光源的激光器采用可以多级放大的 CO₂ 激光器,可提供高至 40 kW 的输入功率。激光和 BTS 完全封闭到真空环境中。BTS 使激光光束聚焦到靶材上,产生稳定的高温、高密

度的等离子体,其发出的 EUV 辐射经过多层膜反射镜组成的收集系统收集并送给下一级光刻系统。

为了保证光源产生的 EUV 光能被有效地收集,减小在成像系统中的损耗,使光源产生的 EUV 辐射最终被充分地用于光刻,整个系统的反射元件必须具有非常高的发射率。目前,在中心波长 13.5 nm 处,光谱带宽(Bandwidth, BW)2% 以内,可制作出反射率接近 70% 的 Mo/Si 多层膜反射镜^[5]。如图 3 所示,Mo 和 Si 原子按 6.7 nm 周期厚度交替叠放,使 13.5 nm 的极紫外光在其中产生相消干涉,从而形成很高的反射效率。这也是研究人员把 13.5 nm 作为 EUVL 主要候选工作波长的原因之一,相应的激光等离子体光源研究工作大多都集中在该输出波长附近^[6]。

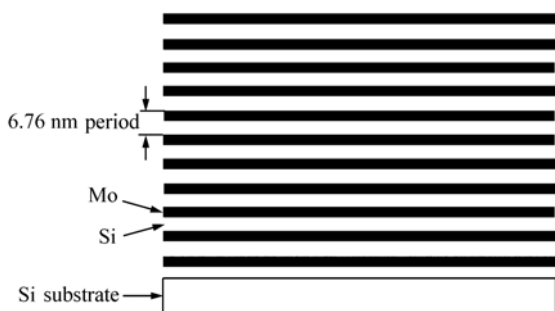


图 3 Mo/Si 多层膜示意图

Fig. 3 Framework of Mo/Si multilayer film

目前,研究人员已经可以在 EUVL 整机系统光源收集的中间聚焦处获得接近 100 W 的极紫外辐射强度^[7-8]。随着 EUVL 中其它各项关键技术难题的突破,以 LPP 为工作模式的 EUVL 有望在几年内投入工业化量产^[9]。但是,在 EUVL 投入工业化生产之前,几个关键技术问题还必须得到进一步解决,这些关键问题主要集中在 EUV 光源的转化效率和光源碎屑两个方面。

(1) EUV 光源转化效率的进一步提高

为了满足基本的商业生产需求,同时有效地控制成本,实际的光刻生产需要保证 100 片 1 h 晶圆以上的生产率,这就要求极紫外光源在进入光刻系统的中间聚焦处的输出功率必须在 115 W 以上。有效提高 EUV 光源转化效率是实现这一功率要求的直接途径。对 13.5 nm 光源而言,

EUV 光源的转化效率(Conversion Efficiency, CE)是指在输出中心波长为 13.5 nm,2% 的带宽内,EUV 输出能量与输入激光能量的比值。可以提供 LPP 光源产生 13.5 nm 附近工作波长的燃料靶材有很多种,其中具有代表性的有氙(Xe)、锂(Li)、锡(Sn)等。截止目前的研究显示:Xe 的极紫外 CE 最高为 1.4%^[10],Li 作为类氢元素,最高 CE 为 2%^[11],而 Sn 产生的 CE 最高可达 3%^[12]。因此,Sn 是目前获得 13.5 nm EUV 最理想的光源靶材。Sn 在 13.5 nm 附近的 EUV 辐射,主要由形成的等离子体中 Sn 高价离子的 $4p^6 4d^N 4p^5 4d^{N+1} \sim 4p 4d^{N-1} 4f (1 \leq N \leq 6)$ 密集跃迁产生的类连续跃迁阵列,即不可分辨跃迁阵列(Unresolved Transition Array, UTA)形成,EUV 辐射的带内部分主要由 $Sn^{8+} \sim Sn^{13+}$ 的离子跃迁形成。

人们发现通过改变靶材形状^[13-14]和入射激光的参数以及聚焦条件等方式都可以有效地提高 EUV 的转化效率。研究结果表明:激光等离子体的 EUV 光转化效率可通过采用靶的形式进行优化。传统的 Sn 实验靶材是平面的,这就会造成激光束聚焦中心周围低强度处产生较冷的稠密等离子体,由于其膨胀速度比中心热等离子体慢,会对中心 EUV 发射主导区域(Emission Dominant Region, EDR)^[15]产生的 EUV 辐射产生较强的吸收,影响 EUV 辐射的转化效率。为了解决这一问题,2003 年,T. Tomie 等人^[16]使用 Sn 的腔限形靶(如图 4 所示)结合双脉冲方式在激光束入射的反方向对 EUV 进行收集,对 13.7 nm 处的窄带 EUV 辐射获得了较高的 CE,但这种方法又在很大程度上限制了 EUV 的收集角度,使其很难应用于 EUVL 工业生产中。

2005 年,Y. Tao 等人^[17]采用 200 μm 宽,15 μm 厚的 Sn 条覆盖在厚 1 μm 的碳氢薄膜上作为靶材(如图 5 所示),使激光脉冲聚焦后的中心部分照射 Sn 条,而强度较低的光斑边缘则照射到碳氢薄膜上,其产生的碳氢等离子体由于其质量小,膨胀速度快,有效地减小了对 EDR 区域发出 EUV 辐射的影响,相比于传统平面 Sn 靶材,EUV 辐射的转化效率提高了 1.4 倍。2005 年,Y. Shimada 等人^[12]将厚度为 1 μm 的 Sn 涂在直径为微米量级的球形塑料靶材上,优化塑料靶材直径后,

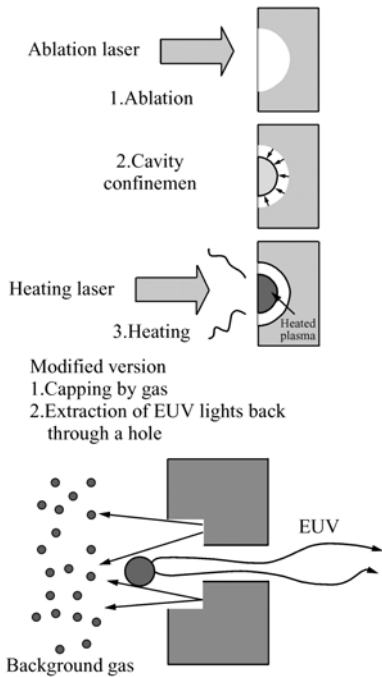


图 4 腔限型等离子体 EUVL 光源^[16]

Fig. 4 EUVL light source generated by cavity-confined plasma^[16]

最终在直径为 400 μm 靶材上,得到了最大为 3% 的转化效率。

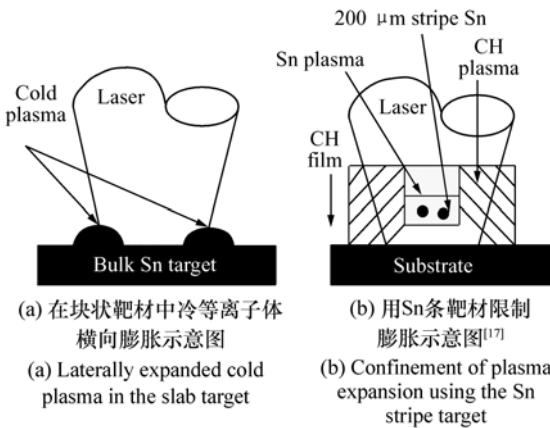


图 5 膨胀示意图^[17]

Fig. 5 Schematic illustration of plasma expansion

同时,除了各种固体形式的靶材外,人们还尝试用液滴状的靶材来获得 EUV 辐射。2004 年, P. A. C. Jansson 等人^[18]通过喷射液体状的 Sn 靶材与激光作用产生等离子体,获得了 2.5% EUV 光转化效率。2008 年, Masanori Kaku 等人^[19]尝试使用喷射液体 SnO₂靶材,并结合双脉冲入射机

制也获得了较高的 EUV 光转化效率,如图 6 所示。

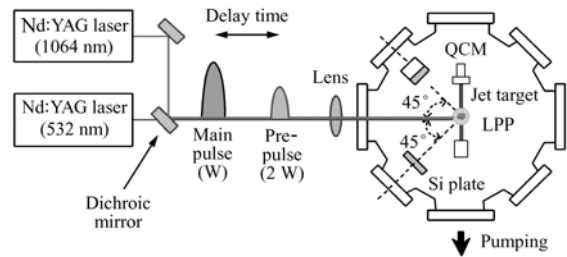


图 6 典型液滴靶实验装置原理图^[19]

Fig. 6 Schematic diagram of typical experimental setup using droplet target^[19]

除了与靶材的形状有关外, EUV 光源的转化效率可进一步通过改变激光参数,如激光波长^[20]、脉宽^[21]、入射光束聚焦情况^[14-15]等条件进行优化。2007 年, J. White 等人^[22]研究了不同激光波长对 EUV 转化效率的影响,在相同的能量条件下,分别使用 CO₂激光脉冲(波长为 10.6 μm)和 Nd:YAG 激光脉冲(波长为 1 064 和 355 nm)在 Sn 靶中形成 LPP 产生 EUV,发现使用 CO₂激光脉冲不仅产生的带内 EUV 相对强度较大,而且其最大 CE 是 Nd:YAG 激光脉冲 LPP CE 的 2.2 倍。2009 年, S. S. Harilal 等人^[23]研究了入射光束聚焦情况对 EUV CE 的影响,通过比较靶材上聚焦焦点时与最佳 CE 聚焦条件时的光斑尺寸,发现由于在焦点时激光脉冲与形成的等离子体之间不能充分的相互作用,导致 CE 在焦点前后形成双驼峰变化,焦点时比最佳 CE 聚焦条件时的 CE 值降低了近 25%。同年, Kasperczuk 等人解释了 EUV 转化效率随靶材上入射激光光束聚焦条件变化的原因,发现聚焦条件实质上影响了形成等离子体的状态,后续激光脉冲强度分布与已形成的等离子体的相互作用情况会最终影响实验结果。过高脉冲激光强度使得 EDR 区域温度过高,使大部分 EUV 发射来自稠密等离子区域中,而稠密区域中 Sn 等离子体有较大的不透明效应,导致在稠密等离子体区域中的 EUV 辐射不能有效地从等离子体中出射,降低了最终的 CE。

(2) 光源碎屑的进一步有效减缓

LPP 光源中,产生高温等离子体的同时会伴有一定数量的碎屑产生,其主要由高能离子、中性

碎屑粒子、微粒团簇和熔融液滴组成^[16]。高能离子的速度约在 $10^6 \sim 10^7$ cm/s,中性原子碎屑稍慢于离子碎屑,速度最慢的是尺寸在微米量级以上的微粒团簇,速度在 10^3 cm/s 左右^[23]。

一方面,碎屑的产生会对光源的光学收集系统造成严重的损伤和影响,主要表现在:一、高能碎屑离子溅射撞击多层膜反射镜表面,造成其结构的损坏;二、能量低的中性碎屑粒子溅射并附着在多层膜反射镜表面,额外的吸收极紫外辐射并加热多层膜,进一步损坏其结构。这些都会使多层膜反射镜反射率降低,从而影响光源长时间的稳定工作^[16]。另一方面,产生的中性粒子碎屑和低电离状态的离子碎屑会强烈地吸收光源产生的 EUV 辐射,从而限制了 EUV 光源的转化效率。大规模的工业化生产要求光刻光源在工作 30 000 h 后,多层膜收集系统效率下降幅度应保持在 10% 以内,因此,有效减少 LPP 中碎屑的产生是 EUVL 技术投入商业化生产前必须解决的关键问题之一。

2005 年, Takeshi Higashiguchi 等人^[24]研究发现 Sn 靶光源中高能离子碎屑能量主要分布在 3 ~ 7 keV,并利用法拉第杯(Faraday Cup, FC)和静电能量分析仪(Electrostatic Energy Analyzer, ESEA)对光源产生离子碎屑的角分布和不同价态离子碎屑的动能分布情况进行了系统的研究。2008 年, D. Nakamura 等人^[26]使用激光诱导荧光(Laser Induced Fluorescence, LIF)成像方法研究了 Sn 细丝靶 LPP 中原子碎屑的空间分布特性以及动力学特性,研究发现 Sn 中性原子碎屑的飞行速度接近 1.5×10^6 cm/s,而且由于靶面的曲率变化使得 Sn 中性原子碎屑的速度分布在平行和垂直于 Sn 细丝靶的方向上有很大不同。

除了对碎屑本身的动力学性质进行研究之外,人们尝试使用多种方法来减缓光源的碎屑,并发现填充缓冲气体和加载磁场等方法可以减缓碎屑的传播。2003 年, Bollanti 等人^[26]用 Kr 气来控制钼 LPP 光源中的碎屑,结果显示缓冲气体显著地减少了到达多层膜反射镜表面的碎屑数量。2007 年, S. S. Harilal 等人^[27]对使用磁场、环境缓冲气体及其联合作用对离子碎屑的影响做了较为系统的研究,发现缓冲气体可用来作为高能离子

的缓和剂。相对其他气体对 EUV 辐射的吸收,氢、氦和氩气在保证对 13.5 nm EUV 输出影响较小的情况下^[28],可使 Sn 离子碎屑的飞行距离大大缩短;另外,加载磁场也可适当地减缓离子碎屑动能。人们还发现入射激光脉冲波长也会对 EUV 光源中的碎屑发射产生影响。2008 年, A. Takahashi 等人^[29]对 CO₂(波长为 10.6 μm)和 Nd:YAG 的 LPP(波长为 1 064 nm)光源进行了对比研究,发现在相同激光能量下,CO₂形成的 LPP 比 Nd:YAG LPP 产生的碎屑少 3/4,但离子碎屑平均能量却高出 3.7 倍。人们也尝试采用改变靶材形状的方法来实现低碎屑。2006 年, S. Namba 等人^[30]使用在空心塑料球上附着最优厚度 Sn 层的质量限制靶来降低碎屑的产生,有效减少了 Sn 材料碎屑的形成。

此外,为了减小光源中碎屑的影响,人们还提出了双脉冲入射方案,通过选择适当强度的预脉冲,先与靶材相互作用产生低不透明度^[31]、低初始密度^[32]的预等离子体,再通过主激光脉冲注入能量,从而既提高了 EUV 发射强度,又可以有效地减少碎屑的产生。2006 年, Y. Tao 和 M. S. Tillack^[33]使用双脉冲方案,使离子碎屑的动能减少了 30 多倍,中性碎屑粒子的能量也显著下降。双脉冲方法实质上是利用预脉冲与主脉冲组合产生的低浓度的预等离子体代替高浓度靶材来有效减少过程中高能量碎屑粒子的产生。

国内关于 EUVL 光源方面的工作相关报道相对较少,据作者所知,中科院长春光机所应用光学国家重点实验室开展了气体靶、液体靶等形式的极紫外光源的研究^[34],中科院上海光机所曾开展过锡固体靶激光等离子体极紫外光源的研究。另外,近期华中科技大学在国家重大科技专项的资助下开展了 Sn 液滴靶激光等离子体极紫外光源的研究^[35],哈尔滨工业大学在国家自然科学基金重点项目的支持下开展了放电等离子体极紫外光源的研究工作^[36]等。

3 超极紫外光刻—6. x nm 极紫外光刻的光源研究

随着 13.5 nm EUV 光刻光源研究的逐渐成

熟,世界上最大的光刻机生产商—荷兰 ASML 公司为代表的众多公司和研究机构又开始了新一轮更短工作波长、分辨率 >8 nm 的超极紫外光刻的研究工作(Beyond EUVL, BEUVL)。在 BEUVL 的工作波长的选择上,以小于 10 nm 可获得高反射率的多层膜元件为原则。从 2010 年开始,国际上开始了输出波长为 6. x nm(6.5 ~ 6.7 nm)的台式激光等离子体光源研究^[37]。目前,在 6.7 nm 处已制备出反射率为 46.2% 的 La/B₄C 多层膜^[38],而且,这个波段工作的多层膜的反射率仍存在着较大的提升空间(其反射率的理论值可超过 74%)^[39]。2010 年, Akira Sasaki 等人^[40]通过等温膨胀模型理论计算了来自 Tb 高价离子的 4d-4f 跃迁产生的 6.5 nm EUV 发射情况,获得了比 13.5 nm 处高一个数量级的 EUV 发射强度,并且与实验测量结果进行了比较,如图 7 所示。不难发现,使用 6. x nm 波长会给极紫外光源应用带来更多的潜在优势:6. x nm 的 EUV 光相对于 13.5 nm 的 EUV 穿透能力大幅提高^[41],带内 EUV 强度比 13.5 nm 的更强,可以通过采用更高气压环境气体阻止碎屑传播,使光源洁净度进一步提高。这些都激起了研究人员对 6. x nm 光刻光源的极大研究热情。

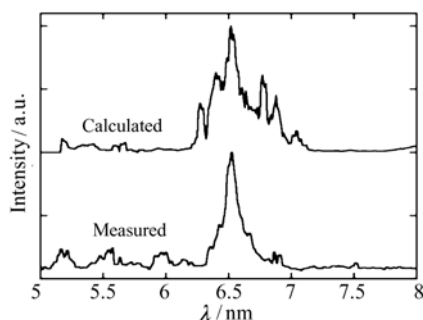


图 7 激光产生 Tb 等离子体的计算和测量比较(激光强度 $5 \sim 8 \times 10^{11}$ W/cm², 光斑直径: 50 μm)^[41]

Fig. 7 Comparison between calculated and measured emission spectra of laser-produced Tb plasma (laser intensity: $5 \sim 8 \times 10^{11}$ W/cm², spot diameter: 50 μm)^[41]

研究发现,稀土元素 Gd 和 Tb 可在 6.7 nm 附

近产生强的窄带共振辐射($n=4 - n=4$ 密集原子跃迁线阵列)^[42]。由于这种跃迁与 Sn 在 13.5 nm 处的跃迁类似^[14,41-46],预计 Gd 和 Tb 的光谱行为与 Sn 的 EUV 源十分相似。通常使用 Nd:YAG 激光器作用于 Gd 和 Tb 产生高功率的 LPP。实验进一步表明:相同的激光强度下, Tb 等离子体的带内 EUV 发射强度比 Gd 等离子体少 12.5%^[47],国际 EUV 光源界普遍认为 Gd 是未来 6. x nm 光源理想的燃料靶材^[37]。因此,从 2010 年开始,研究人员对 Gd 在 6. x nm 处产生的 EUV 辐射的光谱行为和 EUV 转化效率的提高等进行了广泛的研究。

首先,研究了优化激光脉冲参数(强度,脉宽,波长等)对 EUV 辐射的影响。

2010 年, Takamitsu Otsuka 等人^[47]对 6.7 nm 的 EUV 辐射与入射激光波长的关系进行了研究。通过对比相同能量条件下, Nd:YAG 激光器的基频、二次谐波和三次谐波产生的 Gd 的 LPP 光源光谱(如图 8 所示),发现了在 6.5 ~ 6.7 nm 区域内 EUV 光谱的 CE 分别为 1.1%, 0.7%, 0.5%, 更长的激光波长更有利于增加 EUV 带内辐射的转化。

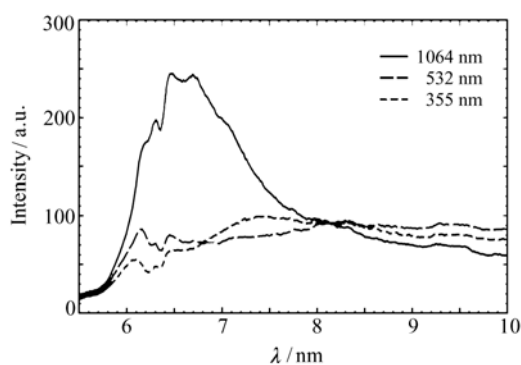


图 8 在相同的 1.6×10^{12} W/cm² 激光强度(激光能量为 320 mJ/脉冲, 光斑直径为 50 μm)下, 激光波长分别为 1064, 532 和 355 nm 的 EUV 光谱^[49]

Fig. 8 EUV spectra at laser wavelengths of 1064, 532, and 355 nm for the same laser intensity of 1.6×10^{12} W/cm² (laser energy: 320 mJ/pulse; spot diameter: 50 μm), respectively^[49]

2012 年, Thomas Cummins 和 Takamitsu Otsuka 等人^[48]研究了入射激光脉冲宽度对 6.7 nm LPP 光源转化效率的影响。通过对比相同能量下, 飞秒、皮秒和纳秒激光脉冲作用 Gd 靶材产生 EUV 辐射的转化效率, 发现皮秒激光脉冲最有利于 6.7 nm EUV 源产生。用 FC 观察到离子碎屑飞行时间谱(Time of Flight, TOF)的变化, 发现较短脉冲产生的离子碎屑的动能较低。

2010 年, Takamitsu Otsuka 等人^[48]通过在不同聚焦光斑尺寸和不同激光强度下比较 Gd 等离子体光谱特征来研究电子温度和等离子体流体力学膨胀损耗对光源的影响。实验表明: 较大的聚焦光斑直径有效地抑制了等离子体流体力学膨胀损失, 从而可以提高 EUV 发射强度。

此外, 人们也通过改变初始靶材密度方式来减少自吸收的影响, 并研究其对提高 6.7 nm EUV 转化效率的作用。

2010 年, Takamitsu Otsuka 等人^[49]对比了采用纯固体 Gd 靶和低密度 Gd₂O₃ 靶中产生 6.7 nm EUV 辐射的情况, 结果显示低密度靶由于减少了自吸收使带内 EUV 转化效率提高了近 0.2%, 说明在 6.7 nm 光源中仍然需要降低等离子体的初始密度以有效减少自吸收的影响。

2011 年, 该研究组又进一步对不同初始密度的 Gd 靶产生的 6.7 nm EUV 转化效率进行了测量^[50](如图 9 所示), 得到在 2% 带宽内, 初始密度为 10% 和 30% 的 Gd 靶 CE 接近, 比传统纯 Gd 靶的 CE 增加了 1.4 倍。同时, 实验还表明: 通过双脉冲入射方案可使 CE 比单脉冲增加 1.2 倍。到目前为止的研究结果表明: 激光强度为 $10^{11} \sim 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时, 可得到 Gd¹²⁺ ~ Gd²⁵⁺ 在 6.7 nm 附近的强共振发射^[46-50]。而 Gd¹²⁺ ~ Gd²⁵⁺ 产生的 6.7 nm EUV 辐射, 对入射激光的波长、脉冲宽度, 聚焦条件, 以及靶材的初始密度都存在依赖关系, 这说明 6.7 nm 的 Gd 靶等离子体光源中自吸收效应对光源的转化效率有很大影响, 光源中形成的等离子体条件对 6.7 nm 波长是光学厚的, 发射光谱的转换效率(CE)同 EUV 辐射的自吸收是一个竞争的平衡过程。研究还表明: 产生有效的 6.7 nm EUV 的 Gd¹²⁺ ~ Gd²⁵⁺ 范围的离子态所对应的等离子体的电子温度在 100 eV 左右^[20],

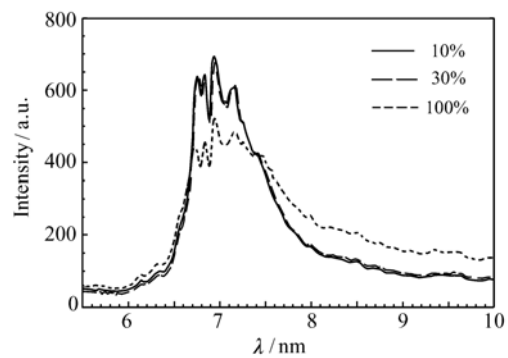


图 9 初始浓度分别为 10%、30% 和 100% 的固体 Gd 靶材在激光强度同为 $5.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ (激光能量为 400 mJ/脉冲, 光斑直径为 30 μm) 下的激光 EUV 光谱^[50]

Fig. 9 Laser produced EUV spectra from targets with initial densities of 10%, 30%, and 100% of solid Gd for the same laser intensity of $5.6 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ (laser energy: 400 mJ/pulse and spot diameter: 30 μm)^[50]

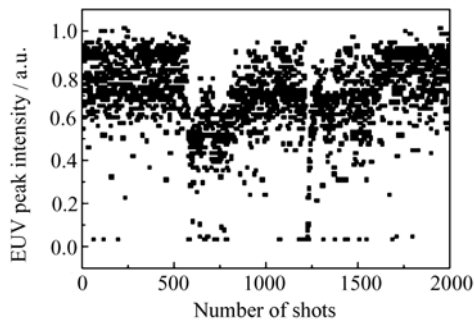
6.7 nm 最佳 Gd 等离子体的电子温度是在 13.5 nm 处 Sn 等离子体最佳电子温度的 3 倍, 基于 Gd 靶产生的 Nd:YAG LPP EUV 光源已经被证实需要在高功率下运行^[51], 相比 13.5 nm 的 EUV, 产生的高密度等离子体导致不透明效应增加, 从而使共振强度减弱, 限制了 EUV 源的输出。因此, 对于 6. x nm 的 EUV 光源, 如何有效降低自吸收, 提高其在带内的转化效率, 还是研究中的一个关键问题。同时, Gd 等离子体光源产生的碎屑问题同样值得关注。

因此, 在未来的研究中, 如何优化等离子体参数来平衡 Gd 离子体光源的自吸收与光发射能力之间的关系, 进而获得 6. x nm 附近极紫外光的高转化效率以及解决光源碎屑对周期性多层膜反射镜的污染, 以达到工业量产所需要光源功率和长时间稳定工作的要求仍是这个方向研究的主要焦点问题, 更多的研究将在这些方面陆续展开。

4 本课题组在极紫外光源和极紫外光刻掩模缺陷检测方面的研究工作

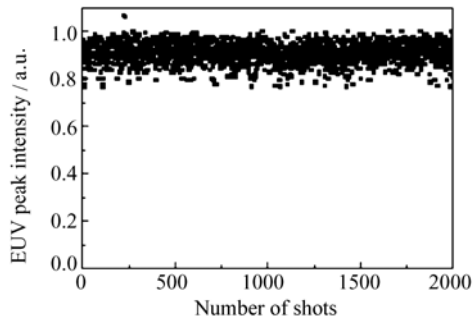
近年来, 本课题组的工作人员在极紫外光刻

关键技术方面开展了一些研究工作。在激光等离子体光源研究方面,为了能够尽量满足未来工业化紫外光源的高工作重复频率、高单发 EUV 转化效率的要求,长春理工大学林景全教授在 2009 年与日本产业技术综合研究所合作^[52],开展了粒子掺杂的液滴靶极紫外光源的研究。该方案采用以水作为载体,包含氮化硼(BN)悬浮液滴的新型靶形式,克服了低碎屑的液体和气体靶材所存在的 EUV 转化效率低的缺陷。实验优化了液滴靶的速度、振动频率等主要实验参数,使液滴靶光源 EUV 发射光强的稳定性从 17.3% 提高到 4.1% (如图 10 所示),并产生了稳定的 4.86 nm 处的 EUV 光辐射。



(a) 利用压电驱动器电源的外触发信号同步控制YAG激光脉冲时获得的结果

(a) EUV peak intensity obtained from YAG laser triggered by signals from a piezo-actuator power supply



(b) 利用检测液滴的He-Ne激光同步信号触发YAG激光时获得的结果^[55]

(b) EUV peak intensity obtained from YAG laser triggered by signals from a He-Ne laser

图 10 液滴靶等离子体的 EUV 光辐射峰值强度随 EUV 光脉冲数的变化

Fig. 10 Measured EUV emission peak values from a water droplet plasma versus the number of laser shots^[52]

同时,为了进一步提高 EUV 光的转化效率,他们采用预激光脉冲汽化并干燥纳米粒子包含的水滴^[53],使纳米粒子能够更有效地吸收主脉冲激光能量,即采用双激光脉冲的方式打靶(如图 11 所示)。

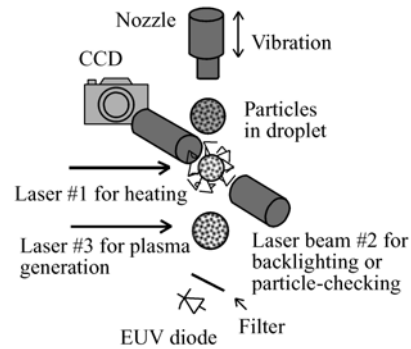


图 11 基于爆炸汽化微粒子包含液滴靶的激光等离子体 EUV 光源装置示意图^[53]

Fig. 11 Sketch of experimental set-up for laser plasma EUV source based on explosive vaporization of a particle-included droplet^[53]

实验结果表明:双脉冲打靶条件下,BN 粒子的 EUV 辐射强度比单脉冲的情况下高出 2 倍以上,如图 12 所示。

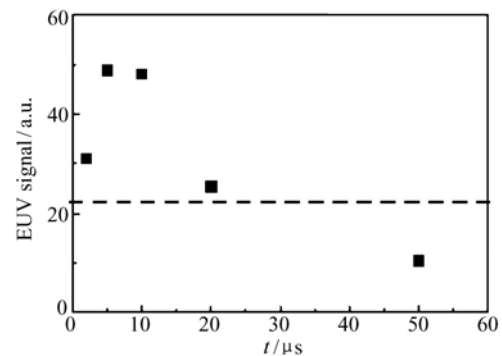


图 12 BN 粒子包含的液滴产生 EUV 峰值信号强度与主、预激光脉冲间延时间的关系。图中每个数据点是 10 发 EUV 光的平均值^[53]

Fig. 12 Dependence of EUV peak signal intensity from the BN particle-included droplet on the delay time between pre/main laser pulses. Each data point displayed in this figure is an average value of ten shots of EUV emission^[53]

为了能够尽量抑制激光等离子体光源中离子碎屑对极紫外多层膜收集镜的污染, 孙英博和林景全等人^[54]开展了 Sn 靶激光等离子体光源的离子碎屑特性及其屏蔽方法的研究。他们用 Nd: YAG 激光脉冲聚焦到 Sn 靶, 用飞行时间法测量了所产生的 Sn 离子碎屑的动能及其空间分布。如图 13 所示, 在接近零点处由于光电效应产生一个快速峰; 随后在约 1.84 μs 处出现了一个 Sn 离子峰, 其对应的动能约为 1.8 keV。在此之前约 1.33 μs 时已开始出现离子信号, 该处所对应的离子动能为最大动能(约 4.2 keV)。

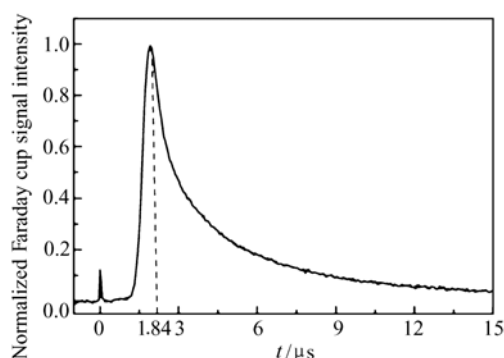


图 13 与靶材法向成 18° 处由法拉第杯测量的典型 Sn 离子 TOF 分布^[54]

Fig. 13 A typical TOF profile of tin ions recorded by Faraday cup at an angle of 18° with respect to the target normal^[54]

同时, 对 Sn 离子动能的角分布情况进行了研

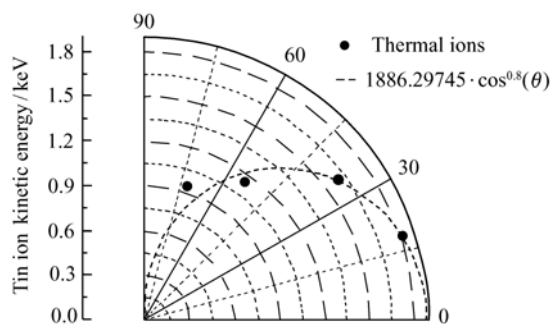


图 14 Sn 离子能量角分布, 0° 代表靶材平面的法向^[54]

Fig. 14 Energy angular distribution of tin ions. Here 0° stands for the normal direction of a plane target^[54]

究。实验发现, Sn 离子动能满足 $\cos^{0.8}(\theta)$ 余弦分布规律(如图 14 所示)。进一步分别用 Ar、He 作为缓冲气体来减缓离子碎屑的传播, 发现压强分别为 5.32 Pa 的 Ar 和 50.54 Pa 的 He 缓冲气体可使到达多层膜位置的离子碎屑减少 90% 以上。

近期, 该研究组正在国家自然科学基金的资助下, 开展输出波长 6.7 nm 的稀土元素 Gd 靶激光等离子体极紫外光源的研究工作。

除了对极紫外光源研究之外, 该组与德国慕尼黑大学合作开展了对极紫外光刻掩模缺陷的相关研究工作。2007 年, 林景全等人^[55]通过使用 EUV 光电辐射电子显微镜(EUV-PEEM)开展了

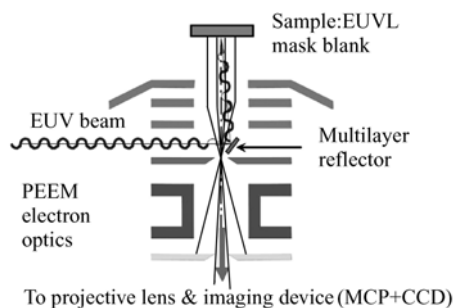


图 15 EUV-PEEM 的示意图^[55]

Fig. 15 Scheme of the EUV-PEEM^[55]

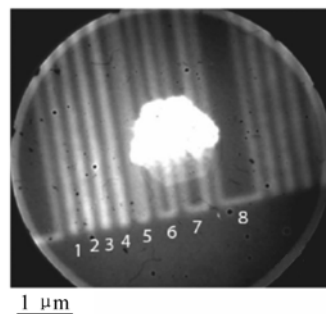


图 16 40 层 Mo/Si 多层膜覆盖着的位相缺陷 EUV 图像。检测所用波长为 13.5 nm, 其中最小的位相缺陷尺寸为 $H = 4$ nm, $W = 35$ nm(图中标示为 1)^[55]

Fig. 16 EUV-PEEM image showing a pattern with varied linewidth defects buried underneath a 40 bilayer Mo/Si multilayer detected at an inspection wavelength of 13.5 nm. The line marked with 1 is the smallest defect with a width of 35 nm and a height of 4 nm^[55]

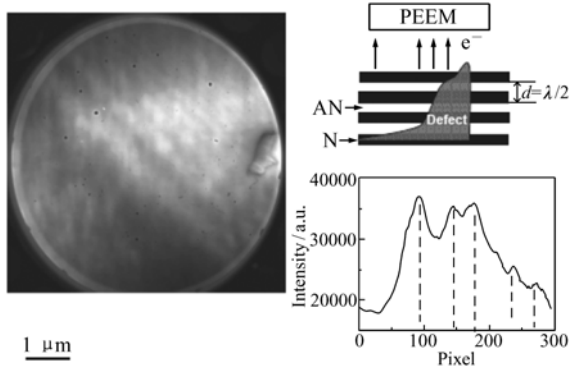


图 17 在 135 nm 处获得的 EUVL 掩模板缺陷 EUV-PEEM 层析图像。图形右上侧为利用驻波方法测量掩模缺陷高度的示意图。右下方为利用该方法对左侧实验结果的分析,对应的缺陷高度约为 35 nm^[56]

Fig. 17 “Tomographic” EUV-PEEM image obtained from an EUVL mask blank stack at 13.5 nm. The curve is a line-scan profile averaged over five different lines scanned perpendicularly across the fringes. The diagram in the upper right of the figure illustrates the edge variation of a defect using a standing wave field. The diagram in the under right of the figure illustrates the analysis of the left experimental result, and the corresponding height variation of the defect is estimated to be ~ 35 nm^[56]

EUVL 掩模位相缺陷的波长检测工作,如图 15 所示,与标准的 PEEM 的照明方式不同(标准 PEEM 的光入射与样品表面的法线方向约成 70° 角),在该装置中 EUV 光束在与法向呈 4° 照射掩模板样品。研究表明:该方法可以得到 35 nm 宽和 4 nm 高位相缺陷的清晰图像,如图 16 所示。

2008 年,林景全等人^[56]进一步采用“干涉衬度”机制光电发射电子显微镜对 EUVL 掩模缺陷进行三维测量。获得了光刻掩模缺陷的清晰图像,并准确地给出了极紫外光刻掩模表面缺陷的三维尺度,如图 17 所示。

5 结束语

光刻技术的发展推动着半导体工业的迅猛发展,而半导体芯片产业技术和对应的光学光刻技术,在新的世纪将是一个国家科学和技术实力的标志。由于社会生产和生活各个领域的强劲需求,必将促进整个世界半导体产业和光刻技术的蓬勃发展。相比前期,我国在该技术领域的沉寂,光刻技术向极紫外波段升级转化的过程,为我国提供了难得的追赶国际水平和自身奋力发展的机遇。积极的借鉴和学习国外的先进技术,通过国内研究人员的不断努力,加之国家越来越强大的综合国力支持,我国的光刻技术和半导体信息产业将循着扎实而稳健的道路快速的发展。

参考文献:

- [1] 张福昌,李艳秋. EUV 光刻中激光等离子体光源的发展[J]. 微细加工技术,2006(5):1-7. ZHANG F CH, LI Y Q. Development of laser produced plasma source for EUV lithography[J]. *Microfabrication Technology*, 2006(5):1-7. (in Chinese)
- [2] 王占山. 极紫外光刻给光学技术带来的挑战[J]. 红外与激光工程,2006(增2):151-156. WANG ZH SH. Extreme ultraviolet lithography challenges to optical technology[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2006(Sup2):151-156. (in Chinese)
- [3] PARKER A. Extreme ultraviolet lithography imaging the future. Lawrence Livermore National Laboratory[EB/OL]. (1999-11-01). [2012-07-11]. <http://www.llnl.gov/str/sween.htm>.
- [4] Industry defining EUV source[EB/OL]. [2012-07-11]. http://www.cymer.com/hvm_1.
- [5] BAJT S, ALAMEDA J, AND SPILLER E. Improved reflectance and stability of Mo/Si multilayers[J]. *SPIE*, 2001, 4506: 65-246.
- [6] International Workshops on EUV Sources, 2010[C]//International workshops on EUV source, Dublin, Ireland, Nov. 13-15, 2010.
- [7] MIZOGUCHI H, ABE H, ISHIHARA T, *et al.*. First generation laser-produced plasma source system for HVM EUV lithog-

- raphy[J]. *SPIE*,2010,7636:763608.
- [8] FOMENKOV I V, BRANDT D C, BYKANOV N B, *et al.*. Laser-produced plasma light source for EUVL[J]. *SPIE*,2010, 7271:727138.
- [9] ASML lithography roadmap[EB/OL]. [2012-07-11]. <http://www.asml.com>.
- [10] SHIMOURA A, AMANO S, MIYAMOTO S, *et al.*. X-ray generation in cryogenic targets irradiated by 1 μm pulse laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*,1998,72:164-166.
- [11] SCHRIEVER G, MAGER S, NAWEED A, *et al.*. Laser-produced lithium plasma as a narrow-band extended ultraviolet radiation source for photoelectron spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*,1998,37:1243-1248.
- [12] SHIMADA Y, NISHIMURA H, NAKAI M, *et al.*. Characterization of extreme ultraviolet emission from laser-produced spherical tin plasma generated with multiple laser beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,86:105-501.
- [13] UENO Y, SOUMAGNE G, SUMITANI A, *et al.*. Enhancement of extreme ultraviolet emission from a CO_2 laser-produced sn plasma using a cavity target[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2007,91:231501.
- [14] HARILAL S S, TILLACK M S, O'SHAY B, *et al.*. Extreme ultraviolet spectral purity and magnetic ion debris mitigation by use of low-density tin targets[J]. *Opt. Lett.*,2006,31:1549-1551.
- [15] O'SULLIVAN G D, CUMMINGS A, DUFFY G, *et al.*. Optimizing an EUV source for 13.5 nm[J]. *SPIE*,2004,5196: 273-281.
- [16] TOSHIHISA T, TATSUYA A, YOSHIFUMI U, *et al.*. Use of tin as a plasma source material for high conversion efficiency [J]. *SPIE*,2003,5037:147-155.
- [17] TAO Y, NISHIMURA H, OKUNO T, *et al.*. Dynamic imaging of 13.5 nm extreme ultraviolet emission from laser-production Sn plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2005,87:241502.
- [18] JANSSON P A C, HANSSON B A M, HEMBERG O, *et al.*. Liquid-tin-jet laser-plasma extreme ultraviolet generation [J]. *Appl. Phys. Lett.*,2004,84:2256-2258.
- [19] KAKU M, SUETAKE S, SENBA Y, *et al.*. Deposited debris characteristics and its reduction of a laser-produced plasma extreme ultraviolet source using a colloidal tin dioxide jet target[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2008,92:181503.
- [20] WHITE J, DUNNE P, HAYDEN P, *et al.*. Optimizing 13.5 nm laser-produced tin plasma emission as a function of laser wavelength[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2007,90:181502.
- [21] ANDO T, FUJIOKA S, NISHIMURA H, *et al.*. Optimum laser pulse duration for efficient extreme ultraviolet light generation from laser-produced tin plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2006,89:151501.
- [22] HARILAL S S, COONS R W, HOUGH P, *et al.*. Influence of spot size on extreme ultraviolet efficiency of laser-produced Sn plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*,2009,95:221501.
- [23] LETARDI T, LO D, ZHENG C E. Particle dynamics of debris produced during laser-plasma soft X-ray generation[J]. *J. Appl. Physics*,2001,89(2):1458-1462.
- [24] HIGASHIGUCHI T, RAJYAGURU C, DOJYO N, *et al.*. Debris characteristics of a laser-produced tin plasma for extreme ultraviolet source[J]. *Rev. Scientific Instruments*,2005,76:126102.
- [25] NAKAMURA D, TAMARU K, AKIYAMA T, *et al.*. Investigation of debris dynamics from laser-produced tin plasma for EUV lithography light source[J]. *Appl. Phys. A*,2008,92:767-772.
- [26] BOLLANTI S, BONFIGLI F, BURATTINI E, *et al.*. High-efficiency clean EUV plasma source at 10 ~ 30 nm, driven by a long-pulse-width excimer laser[J]. *Appl. Phys. B.*,2003,76:277-284.
- [27] HARILAL S S, O'SHAY, TAO Y, *et al.*. Ion debris mitigation from tin plasma using ambient gas, magnetic field and combined effects[J]. *Appl. Phys. B.*,2007,86:547-553.
- [28] The center X-ray optics[EB/OL]. [2012-07-11]. http://www-cxro.lbl.gov/optical_constants/gastrn2.html.
- [29] TAKAHASHI A, NAKAMURA D, TAMARU K, *et al.*. Emission characteristics of debris from CO_2 and Nd:YAG laser-produced tin plasmas for extreme ultraviolet lithography light source[J]. *Appl. Phys. B.*,2008,92:73-77.
- [30] NAMBA S, FUJIOKA S, NISHIMURA H, *et al.*. Spectroscopic study of debris mitigation with minimum-mass Sn laser

- plasma for extreme ultraviolet lithography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:171503.
- [31] HIGASHIGUCHI T, KAWASAKI K, SASAKI W, *et al.*. Enhancement of extreme ultraviolet emission from a lithium plasma by use of dual laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:161502.
- [32] HIGASHIGUCHI T, DOJYO N, HAMADA M, *et al.*. Low-debris, efficient laser-produced plasma extreme ultraviolet source by use of a regenerative liquid microjet target containing tin dioxide(SnO_2) nanoparticles[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:201503.
- [33] TAO Y, TILLACK M S. Mitigation of fast ions from laser-produced Sn plasma for an extreme ultraviolet lithography source [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89:111502.
- [34] 林景全, 陈波, 尼启良, 等. 激光等离子体软 X 射线源靶材的选择及特性[J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(3):429-432.
- LIN J Q, CHEN B, NI Q L, CAO J L, *et al.*. Target material choice and its characteristic of laser-produced plasma source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3):429-432. (in Chinese)
- [35] 朱新旺, 王新兵, 傅焰峰, 等. CO_2 激光等离子体极紫外光源收集镜研究[J]. *激光技术*, 2010, 34(6):725-728.
- ZHU X W, WANG X B, FU Y F, *et al.*. Research of collector mirrors of CO_2 laser produced plasma EUV source[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6):725-728. (in Chinese)
- [36] 程元丽, 李思宁, 王琪, 等. 激光等离子体和气体放电 EUV 光刻光源[J]. *激光技术*, 2004, 28(6):561-564.
- CHENG Y L, LI S N, WANG Q. Extreme ultraviolet source of microlithography based on laser induced plasma and discharge induced plasma[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(6):561-564. (in Chinese)
- [37] DUNNEP, CUMMINS T, WHITE J, *et al.*. Laser-produced terbium and gadolinium plasmas as EUVL source at 6.5~6.7 nm[C]//International Workshop on EUV Source 2010, Dublin, Ireland, Nov. 13-15, 2010.
- [38] PLATONOV Y. Status of EUVL multilayer optics deposition at RIT[C]//International Workshop on EUV Source 2010, P31, Dublin, Ireland, Nov. 13-15, 2010.
- [39] BENSCHOP J. EUV: Status and challenges ahead[C]//Proceedings of the 2010 International Workshop on EUVL, Maui, HI, Jun. 24, 2010.
- [40] SASAKI A, NISHIHARA K, SUNAHARA A, *et al.*. Theoretical investigation of the spectrum and conversion efficiency of short wavelength extreme-ultraviolet light sources based on terbium plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97:231501.
- [41] CARROLL P K, O'SULLIVAN G. Ground-state configurations of ionic species I through XVI for $Z = 57-74$ and the interpretation of 4d-4f emission resonances in laser-produced plasmas[J]. *Phys. Rev. A*, 1982, 25:275-286.
- [42] GWYN C W, STULEN R, SWEENEY D, *et al.*. Extreme ultraviolet lithography[J]. *Vac. Sci. Technol. B*, 1998, 16:3142-3419.
- [43] FUJIOKA S, NISHIMURA H, NISHIHARA K, *et al.*. Opacity effect on extreme ultraviolet radiation from laser-produced tin plasmas[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, 95:235004.
- [44] TANAKA H, MATSUMOTO A, AKINAGA K, *et al.*. Comparative study on emission characteristics of extreme ultraviolet radiation from CO_2 and Nd:YAG laser-produced tin plasmas[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 87:041503.
- [45] HAYDEN P, CUMMINGS A, MURPHY N, *et al.*. 13.5 nm extreme ultraviolet emission from tin based laser produced plasma sources[J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 99:093302.
- [46] FUJIOKA S, SHIMOMURA M, SHIMADA Y, *et al.*. Pure-tin microdroplets irradiated with double laser pulses for efficient and minimum-mass extreme ultraviolet light source production[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, 92:241502.
- [47] OTSUKA T, KILBANE D, WHITE J, *et al.*. Rare-earth plasma extreme ultraviolet sources at 6.5-6.7 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97:111503.
- [48] CUMMINS T, OTSUKA T, YUGAMI N, *et al.*. Optimizing conversion efficiency and reducing ion energy in a laser-produced Gd plasma[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100:06118.
- [49] OTSUKA T, KILBANE D, HIGASHIGUCHI T, *et al.*. Systematic investigation of self-absorption and conversion efficiency of 6.7 nm extreme ultraviolet sources[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97:231503.

- [50] HIGASHIGUCHI T, OTSUKA T, YUGAMI N, *et al.*. Extreme ultraviolet source at 6.7 nm based on a low-density plasma [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99:191502.
- [51] COLOMBANT D, TONON G F. X-ray emission in laser-produced plasmas [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44:3524-3537.
- [52] LIN J Q, TOSHIHISA T. Supply of a particle-included droplet as laser plasma target for extreme ultraviolet emission [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, 42:045204.
- [53] LIN J Q, TOSHIHISA T. Enhancement of EUV emission intensity from particles in a droplet by exploding the droplet [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2009, 42:155203.
- [54] SUN Y B, LIN J Q, GAO X, *et al.*. Characteristics of ion debris from laser-produced tin plasma and mitigation of energetic ions by ambient gas [J]. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2012, 55:392-395.
- [55] LIN J Q, WEBER N, MAUL J, *et al.*. At-wavelength inspection of sub-40 nm defects in extreme ultraviolet lithography mask blank by photoemission electron microscopy [J]. *Optics Lett.*, 2007, 32(13):1875-1877.
- [56] LIN J Q, WEBER N, ESCHE M, *et al.*. Three-dimensional characterization of extreme ultraviolet mask blank defects by interference contrast photoemission electron microscopy [J]. *Optics Express*, 2008, 16(20):15343-15352.

作者简介:



窦银萍 (1987—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 2010 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事激光等离子体极紫外光刻光源方面的研究。E-mail: douzi714@126.com



林景全 (1966—), 男, 吉林人, 博士, 教授, 博士生导师, 1999 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事飞秒激光与物质相互作用、极紫外光刻关键技术、光辐射电子显微术等方面的研究。E-mail: linjingquan@cust.edu.cn



孙长凯 (1979—), 男, 辽宁辽阳人, 博士, 讲师, 2002 年于辽宁师范大学获得学士学位, 2005 年、2010 年于吉林大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事量子相干控制, 激光等离子体极紫外光刻光源等方面的研究。E-mail: changkaisun@cust.edu.cn