

激光与光电子学进展

极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势

林楠^{1,2*}, 杨文河^{1,2}, 陈韞懿^{1,2}, 魏鑫^{1,2}, 王成², 赵娇玲², 彭宇杰², 冷雨欣^{2**}

¹上海大学微电子学院, 上海 200072;

²中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学工程部(筹), 上海 201800

摘要 随着芯片特征尺寸的不断减小,借助 193 nm 准分子光源的浸没式深紫外光刻技术已进入瓶颈,使用多次曝光技术的工艺路线也已到达目前的商用极限。极紫外光刻(EUVL)采用 13.5 nm 的极紫外光源,被认为是下一代光刻商用化路线必需的技术。综述了激光等离子体 13.5 nm EUVL 光源的原理和最新进展,分别从驱动光源、靶材、收集镜等关键子系统展开介绍。讨论了激光等离子体光源进一步发展过程中需要解决的问题,如提升激光功率、提高转换效率及延长光源寿命,特别分析了日本 Gigaphoton 公司和荷兰 ASML 公司的 EUVL 光源装置。

关键词 光学设计; 极紫外光源; 激光等离子体; 液滴锡靶; 转换效率; 光源碎屑

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922002

Research Progress and Development Trend of Extreme Ultraviolet Lithography Source

Lin Nan^{1,2*}, Yang Wenhe^{1,2}, Chen Yunyi^{1,2}, Wei Xin^{1,2}, Wang Cheng², Zhao Jiaoling², Peng Yujie², Leng Yuxin^{2**}

¹School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

²Department of Precision Optics Engineering, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Owing to the continuous reduction in the chip feature size, supported by a 193 nm excimer light source, the deep ultraviolet immersion lithography has reached a bottleneck. The process route using multiple patterning technology has reached the current commercial limit. To address this issue, extreme ultraviolet lithography (EUVL), employing a 13.5 nm extreme ultraviolet light source, has been successfully used in high-volume manufacturing. Thus, it has become an essential technology for the next-generation lithography commercialization. Herein, the principle and latest developments in the 13.5 nm extreme ultraviolet lithography in laser-produced plasma have been reviewed, and the key subsystems, including the driving laser, target, and collecting mirror, have been introduced. Moreover, major challenges that need to be solved in the further development of laser-produced plasma source have been discussed, including the improvement of the driving power and conversion efficiency as well as the prolongation of the light source life. Finally, the EUVL source devices of Japan's Gigaphoton Company and Holland's ASML Company have been analyzed.

Key words optical design; extreme ultraviolet light source; laser-produced plasma; tin droplet; conversion efficiency; light source debris

收稿日期: 2022-01-21; 修回日期: 2022-02-21; 录用日期: 2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(61925507)

通信作者: *nanlin@siom.ac.cn; **lengyuxin@mail.siom.ac.cn

1 引言

集成电路自发明以来被应用到了各行各业中,并迅速将人类从工业社会带到信息社会,集成电路的发明者 Jack Kilby 也因此获得了 2000 年诺贝尔物理学奖。集成电路或芯片是通过光刻(Lithography)在硅晶圆上逐层构建复杂的晶体管图案制成。光刻系统本质上是一种投影系统,依靠对光的精准控制,通过光化学反应将事先制备好的掩模(Mask)缩小并转印到硅晶圆上。光刻机作为集成电路工业发展的重要支柱设备之一,是整个半导体产业发展的主要技术支撑。Moore^[1]的研究表明,集成电路上可容纳的晶体管数量每两年会增加一倍,而每次集成度的提高实际上都对光刻技术提出了更高的要求。由瑞利判据(Rayleigh criterion)^[2]可知,光刻分辨率 R_{scanner} 与工艺因子 k_1 、波长 λ 成正比,与数值孔径 NA 成反比。光刻分辨率的提高可通过减小曝光光源的波长、减小工艺因子或增大投影透镜的数值孔径来实现。工艺因子 k_1 是一个与芯片制造工艺因素相关的系数,可通过计算光刻等技术调整,其物理极限为 0.25。

从光源发展情况来看,光刻机经过了五次波长迭代。从最初紫外波段的高压放电汞灯 g-line (436 nm)到 i-line (365 nm),再发展到深紫外波段的准分子激光器 KrF (248 nm)以及 ArF (193 nm)^[3-4],目前最先进的极紫外光刻机采用 13.5 nm (2% 带宽)的极紫外光(EUV)^[5],其光源波长缩小到了 g-line 的 1/30。此外,非球面镜头制造能力的提升也在不断刷新数值孔径的极限,g-line 光刻机诞生之初数值孔径 NA 只有 0.28^[6],而目前荷兰阿斯麦(ASML)公司最先进的干式深紫外(DUV)光刻机 NXT:1470 搭载的投影物镜 NA 已经达到了 0.93。Lin^[7]提出浸没式光刻的概念后,ASML 公司通过在透镜和光刻胶中间填入去离子水,利用去离子水折射率比空气高的特性,制作了等效 NA 为 1.35 的浸没式光刻机,该系列目前最先进的机型 NXT:2050i 每小时可曝光 295 片 300 mm 的晶圆。EUV 光刻机的光源处在极紫外光波段,只能依靠反射镜设计, NA 有所降低,ASML 公司目前最先进机型 NXE3600D 的 NA 为 0.33,未来计划将 NA 提升到 0.55^[8]。

台湾积体电路制造股份有限公司(简称台积电公司,TSMC)和三星公司(Samsung)在 7 nm 的技术节点引入了极紫外光刻(EUVL),三星公司通过

对比单次 EUV 曝光和 DUV 浸没式多次曝光发现,前者在成像质量、设计难度、良率和成本各方面均优于后者^[9],这也标志着先进半导体制程正式进入 EUVL 时代。此外,TSMC 和三星公司已实现了 5 nm 半导体制程量产,且均使用了 EUVL。如海思半导体的麒麟(Kirin)9000 系列芯片以及苹果公司 M1 芯片和 A15 仿生芯片均采用了台积电公司的 5 nm 工艺,高通公司的骁龙(Snapdragon)888 则采用了三星公司的 5 nm 工艺。EUV 光刻机已成为半导体大规模量产和工业化不可或缺的设备,也是未来工艺制程延续的保障。EUV 光刻机最关键的六大分系统为 EUV 光源、照明系统、投影物镜、掩模台、双工件台、对准套刻系统,EUV 光源是其中最为核心的分系统,也是 EUV 光刻机实现稳定运行的最大难点。因此,本文结合国内外众多机构的研究结果对 EUV 光源的发展现状进行归纳总结,同时结合产业趋势对 EUV 光源的发展趋势进行预测。

2 EUV 光刻光源技术

目前商用 EUV 光刻机采用 13.5 nm 的 EUV 光源,为了满足大规模量产的需求,其光源系统应具有输出功率高且稳定、转换效率高、污染低、维护成本低等性能。以 ASML 公司的商业化光源为例,其平均功率可达到 250 W,转换效率为 5.5%~6%,收集镜的反射率衰减每十亿发脉冲小于 0.05%,系统可用性高于 85%,可实现每天稳定高于 2500 片 300 mm 晶圆的产量^[10]。曾被考虑用来产生 EUV 光源的主流方案有同步辐射光源、自由电子激光器(FEL)、激光等离子体(LPP)、放电等离子体(DPP)和激光辅助放电等离子体(LDP)。ASML 公司收购美国光源公司 CYMER 后^[11],LPP 成为了其选择的技术路线。作为全球唯一的 EUV 光刻机生产商,ASML 基于 LPP 原理生产的 NXE3600D 搭载了功率为 250 W 的 EUV 光源^[12]。此外,日本的光源公司 Gigaphoton 基于不同的 LPP 原理也制造出了功率为 250 W 的 EUV 光源^[13]。

LPP 极紫外光源的运行原理是通过高强度激光与靶材的相互作用,使靶材吸收层被加热气化并产生等离子体^[14],由于逆韧致吸收(IBA)^[15]等离子体持续被加热,同时释放出超宽光谱辐射。在热平衡状态下,可通过黑体辐射理论解释特定波长和温度之间的关系,产生 EUV 光刻所需中心波长 λ_{max} 处于 13.5 nm 附近的温度 T_e (单位为 eV)可以通过维恩位

移定律(Wien's displacement law)计算^[16],约为 20 eV (太阳表面温度的 40 倍)^[17]。中心波长可表示为

$$\lambda_{\max} \approx 250/T_e \quad (1)$$

对比 T_e 的理论数值与实际数值发现,二者之间存在较大的差距。实验中 T_e 的温度范围为 30~100 eV^[18-19]。Rollinger^[20] 对该现象进行了解释,Poirier 等^[21] 根据典型 EUV 等离子体参数获得的阈值电子密度和临界电子密度不一致,也表明在等离子体羽流的主要部分不满足局部热平衡。在非局部热平衡状态下,除了电子碰撞,其他过程也非常重要,如碰撞辐射体系,这也是动力学温度并不等于辐射普朗克温度的原因。

ASML 公司商用化的 EUV 光刻机光源采用了双脉冲激发方案^[22-23],如图 1 所示。其作用过程可以

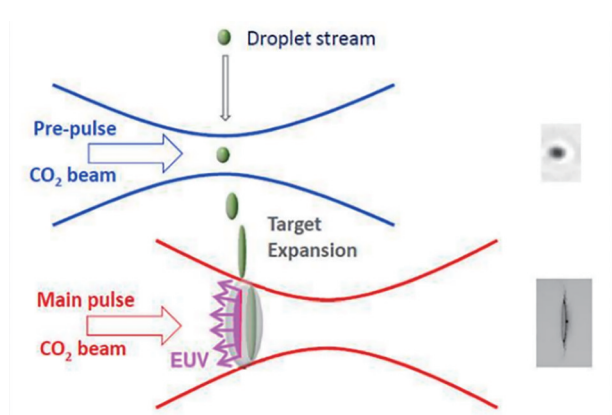


图 1 商用化激光等离子体 EUV 光源双脉冲方案的原理图^[22]

Fig. 1 Schematic diagram of double pulse scheme of commercial laser plasma EUV source^[22]

分为 4 步:1)锡液滴产生器将大小适宜且高速稳定的锡液滴供给作用区域;2)预脉冲激光精准轰击迅速通过的锡液滴,使其扩散成适宜的形状分布;3)主脉冲激光轰击,通过激光激发等离子体物理机制产生极紫外光;4)产生的极紫外光被收集镜收集,经过光谱纯化传输至光刻系统以曝光晶圆。

ASML 公司的 NXE3400C 机型搭载平均功率为 250 W 的 EUV 光源,晶圆厂每台机器在 20 mJ/cm² 曝光剂量下能实现每小时 170 片 300 mm 晶圆的产量。借助 NXE3600D 光刻机,ASML 公司使每台机器在 30 mJ/cm² 曝光剂量下能实现每小时 160 片 300 mm 晶圆的产量^[10],且在实验室实现了平均功率为 420 W 的闭环控制,瞬时平均功率甚至能达到 530 W^[24]。

光刻光源在光刻系统接口处(IF)的功率^[25]可表示为

$$P_{\text{EUV}} \propto P_{\text{laser}} \times X_{\text{CE}} \times T \times (1 - X_{\text{Dose}}), \quad (2)$$

式中, \propto 为 正 比 符 号, P_{EUV} 和 P_{laser} 分 别 为 产 生 的 极 紫 外 光 功 率 和 激 发 光 功 率, X_{CE} 为 由 激 发 光 产 生 2π sr 范 围 内 波 长 为 13.5 nm (带 宽 为 2%) 极 紫 外 光 的 转 换 效 率 (CE), T 为 考 虑 收 集 镜 收 集 角 度、反 射 率、背 景 气 体 透 过 率、光 谱 纯 化 效 率 等 参 数 的 整 体 传 输 效 率, $1 - X_{\text{Dose}}$ 为 满 足 特 定 曝 光 剂 量 要 求 的 EUV 功 率 比 例。可 以 发 现,若 想 提 升 EUV 光 源 的 平 均 功 率,可 从 提 升 激 发 光 功 率、提 升 EUV 转 换 效 率、提 升 整 体 传 输 效 率 以 及 增 强 光 源 功 率 稳 定 性 四 个 方 面 入 手。

商用化 LPP EUV 光源的整体架构如图 2 所

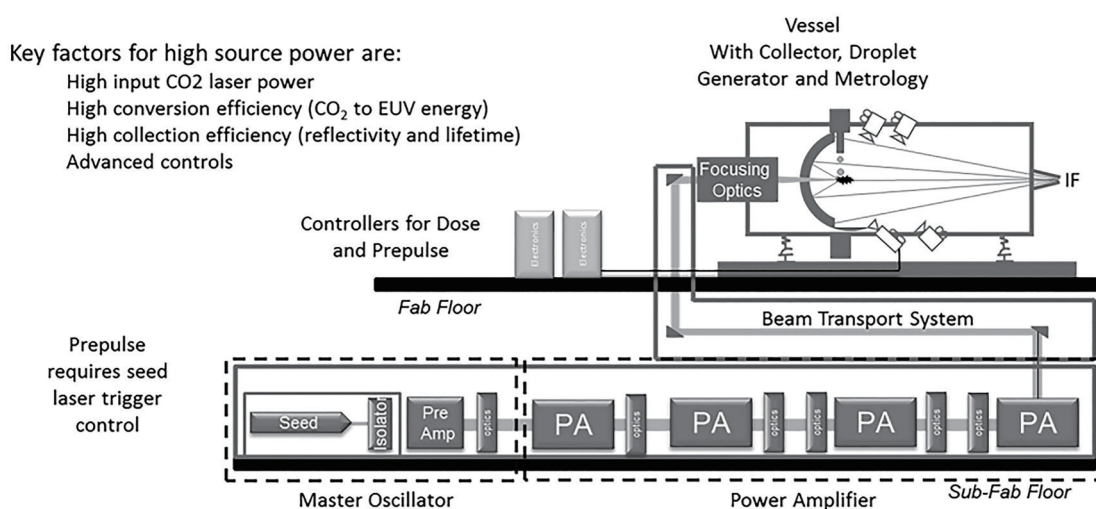


图 2 LPP 光源系统架构示意图^[25]

Fig. 2 Architecture representation of the LPP source system^[25]

示,其核心模块包括驱动激光、光束控制传输模块、真空系统、液滴锡靶产生器、收集镜、污染控制模块。因此,针对商用化 LPP 技术,分别讨论了 LPP 驱动光源、液滴锡靶、收集镜三大核心子模块的发展进程和研究现状,并剖析了 EUV 光源的核心技术难点。

3 LPP 驱动光源

3.1 LPP 驱动光源的选取

LPP 方案中驱动光源的选择至关重要。激光光的波长、脉冲能量均会影响 CE 和生成的光源碎屑^[26-29]。CO₂激光和 Nd:YAG 激光具有功率大、转

换效率高且工作稳定性好等优点,成为 LPP 驱动光源的热门备选方案^[30-31]。Aota 等^[26]和 Endo 等^[32-33]用上述两种激光照射锡(Sn)靶分析不同激光对 CE 的影响,结果表明,相比 Nd:YAG 激光,CO₂激光的 CE 更高^[26]且产生的碎屑数量更少、光谱纯度更高^[32-33]。LPP 方案产生 EUV 的辐射区域和激发光能量沉积区域如图 3 所示。可以发现,相比 Nd:YAG 激光,CO₂激光脉冲能量沉积区域与 EUV 辐射区域的距离较近,呈光学薄特性^[34],能量转换过程中的损耗更低,只需吸收较少的热量便可转移至 EUV 激光能量辐射区域。基于这些优点,CO₂激光成为了业界主流的 LPP 驱动光源。

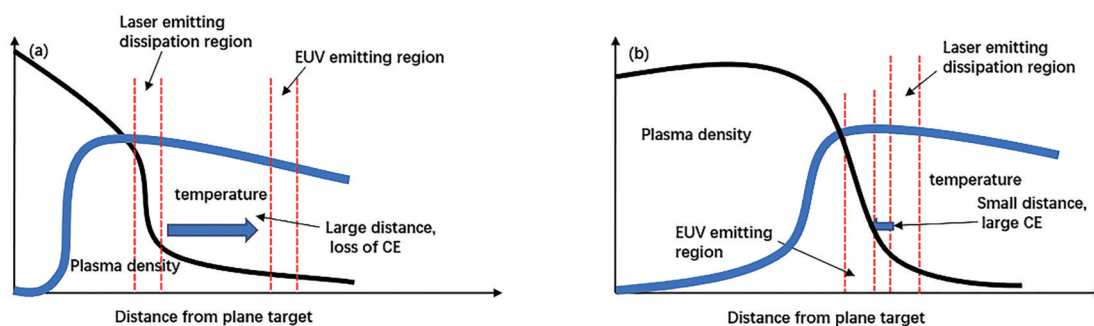


图 3 不同激光诱发的激光等离子体 EUV 辐射区域与激光能量沉积区域。(a) Nd:YAG 激光;(b) CO₂激光^[30]

Fig. 3 Regions of EUV radiation and laser energy deposition induced by different lasers. (a) Nd:YAG laser; (b) CO₂ laser^[30]

3.2 CO₂激光的工作原理

为了达到产生 EUV 所需的单脉冲能量和平均功率,目前的主流方案采用了主振荡器功率放大(MOPA)技术,其原理如图 4 所示。其中,主泵浦

CO₂系统结构主要由振荡器、隔离器、预放大器 and 主放大器构成,采用主振荡功率放大,由振荡器产生高重频、短脉冲 CO₂种子光经多级 CO₂激光放大器实现功率放大。

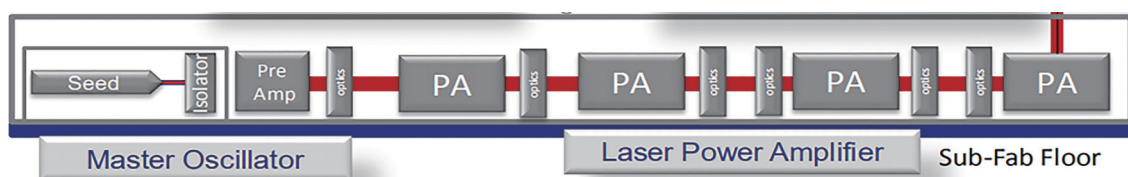


图 4 MOPA 技术的原理图^[35]

Fig. 4 Schematic diagram of the MOPA technology^[35]

振荡器方面,主要的调制手段有调 Q 和腔倒空(一种特殊的调 Q)。调 Q 方式实现的脉冲宽度约百 ns 量级,而腔倒空方式可实现 20 ns 以下的脉冲宽度,成为目前振荡器主流的调制方案^[36-38]。功率放大器方面,主要有快轴流 CO₂激光器(FAF)和横流 CO₂激光器(FTF)^[25,38]两种。横流 CO₂激光器的气流方向与光束方向垂直,对应的增益截面较大且支持多程放大技术;而快轴流 CO₂激光器的气流方向与光束方向平行,光束轴心与放电管轴心重合使得对应横向增益分布更均匀且光束质量较优。

实际应用中,振荡器方面:ASML 公司使用射频泵浦电光腔倒空 CO₂激光器作为振荡器,可获得较高功率的 CO₂激光且技术相对成熟^[25];Gigaphoton 公司使用了多线放大技术即量子级联激光器(QCL),可精确控制输出激光的波长和线宽^[39];俄罗斯圣彼得堡国家信息技术、机械学与光学研究型大学(简称为圣光机)使用 1.06 μm 激光器,经受激拉曼产生 9.1~10.6 μm 波段的种子光^[40]。隔离器方面:为了抑制光的反向传输和消除时域脉冲之间的噪声光,Gigaphoton 公司和俄罗斯

圣光机均使用了 SF₆ 可饱和吸收隔离器^[40], 避免了 CO₂ 激光发生自振荡与背反射, 进而损害光学镜和隔离器。预放大器方面: ASML 和 Gigaphoton 公司均采用了射频激励的板条 CO₂ 激光放大器作为预放大器^[25, 34]。主放大器方面: Gigaphoton 公司采用了三菱重工快横流激光放大器, ASML 公司则利用德国通快公司提供的高频率快轴流 CO₂ 激光放大器^[25]。

3.3 CO₂ 激光高功率的技术难点

MOPA 的关键技术是短脉冲 CO₂ 激光的放大与隔离。由 CO₂ 激光放大的基本原理可知, CO₂ 种子光在功率放大器中的放大效率直接决定了 MOPA 系统输出的激发光功率, 也决定了系统输出 EUV 光源的平均功率。短脉冲 CO₂ 激光增益特性 (包括时间增益和空间增益) 的研究和脉冲波形演化是 LPP EUV 系统的核心研究内容。张自豪^[41] 基于封离式玻璃管的 CO₂ 激光开展了系统的声光调 Q 实验, 在重复频率为 1 kHz 时, 得到的峰值功率为 4.5 kW, 脉冲宽度约为 200 ns。张冉冉^[38] 用电光腔倒空的调制方式产生的脉冲宽度在 18 ns 以内。胡志^[42] 通过实验研究了快轴流 CO₂ 激光放大器的增益系数与其放电电流和气体流速分布的关系。易翔宇^[43] 搭建的 CO₂ 激光主振放大系统, 用功率为 4 kW 的快轴流 CO₂ 激光器作为放大器, 对脉冲宽度为 300 ns 左右的机械调 Q 激光进行放大, 并研究了该放大器对不同特性种子光的功率放大情况。黄鸿雁^[44] 研究了快轴流 CO₂ 激光器的热交换以及流场特性对高效激光输出及长时间稳定运行的影响。国外的研究大多集中在 CO₂ 激光的空间增益特性上, 如: Polyanskiy 等^[45] 采用啁啾脉冲放大 (CPA) 技术将 CO₂ 激光放大器的能量提高了 1 个数量级; Feldman^[46] 对 10.6 μm 的 CO₂ 激光多线短脉冲在高增益 CO₂ 激光放大器中的放大和压缩进行了理论研究; Baeva 等^[47-48] 研究了放电管气体湍流和对流对增益的影响。CO₂ 激光放大器增益时域特性研究多使用 Frantz-Nodvik (F-N) 方程^[49-51], 可用于评估放大器参数对输出光的影响和分析放大期间的脉冲波形演化。目前对 CO₂ 激光在时间增益的研究较少, 对在连续放大器上实现短脉冲 CO₂ 激光放大的动力学过程研究还不成熟。在快轴流功率放大器实现更高功率放大方面, 还需在短脉冲 CO₂ 时域分析上取得较多的突破。

SF₆ 可饱和吸收光隔离器作为目前主流

MOPA-CO₂ 激光系统的可饱和吸收光隔离器, 适用于大功率 MOPA 体制的 CO₂ 激光放大系统。但还存在着上能级弛豫时间较慢和插入损害较大等缺点^[52], 目前人们还在寻找更好的新型可饱和吸收材料。张冉冉^[38] 仿真了石墨烯层数对时域波形演化和透过率的影响, 结果表明, 石墨烯的损伤阈值较小, 可作为 SF₆ 隔离器的补充。但后续还需要探寻更多种类的新型二维材料, 获得损伤阈值高、吸收系数大、漂白透过率高、上能级弛豫时间更快的新型材料, 从而搭建性能更优异的新型可饱和吸收光隔离器^[38, 53-55]。

3.4 不同公司的技术应用路线

Gigaphoton 公司基于 LPP 方案用 18 kW 的 CO₂ 激发光产生了 250 W 的稳定 EUV 光, 并完成了持续时间长达一周的测试工作, 成功演示了 330 W EUV 光的运行, 同时升级了功率高达 27 kW 且光束均匀的 CO₂ 激发光。进一步通过 Thomson 散射对等离子体各参数进行了优化, 并在 Pilot#1 系统上证实了该系统可输出 350 W 的 EUV 光^[13]。ASML 公司下一代推出的 NA 为 0.55 的光刻技术, 其光刻机内部反射镜的数目增加了 2 个部件, 多出一倍的光学镜损耗, 对光源系统产生 EUV 光的功率需求高达 800 W。Gigaphoton 公司提出了用连续 8 级快横流功率放大器实现高达 52 kW 的 CO₂ 激发光, 但也额外增加了 15 m² 的占地面积和 600 kW 的电能消耗^[13]。

ASML 公司使用重复频率为 50 kHz、功率为 21.5 kW 的 CO₂ 激发光产生 250 W 稳定的 EUV 光。其中, 21.5 kW 的激发光采用 MOPA (4 级快轴流功率放大器) 实现。用于 7 nm 和 5 nm 逻辑节点的 EUV 光刻机销量在持续增加, 新一代 NXE:3400C 光刻机的可用率已达 90%。2018 年, 该公司在实验室内开发了开环、15 ms 脉冲模式 (Burst mode)、3% 占空比下产生 EUV 光峰值功率达 450 W (重复频率为 50 kHz, 每束脉冲的能量达 9 mJ) 的系统, 2021 年, 该公司进一步将系统的峰值功率增加至 530 W^[24, 35]。

4 靶材液滴的产生过程

4.1 靶材的选取

能在中心波长为 13.5 nm (2% 带宽) 波段发出 EUV 光的靶材有很多种, 人们针对不同靶材的性质展开了理论与实验研究, 以找到在不产生较多碎屑

的同时获得较高 CE 的材料。处于稳态的锂等离子体在高温下仅有极少量的 Li^{2+} 离子处于电离平衡态,导致锂离子在 13.5 nm 处能产生的 EUV 光有限,CE 较低^[30,56-58],基于 LPP 的锂靶 CE 仅为 1%~2%^[57,59-60];氙(Xe)是一种惰性气体,在室温下不易沉积,也不易在激光光学元件上产生碎屑^[61-62],由于 Xe^{10+} 的能级跃迁 $4d^8 \rightarrow 4d^7 5p$ 在 13.5 nm 处产生一个相对较弱的峰值^[63],基于 LPP 的 Xe 靶 CE 仅为 0.6%^[62,64]。Sn 在 13.5 nm 处的极紫外辐射来源非常丰富,主要由等离子体中 $\text{Sn}^{7+} \sim \text{Sn}^{10+}$ 离子跃迁导致^[65]。人们先通过研究固体锡靶,尝试通过改变固体锡靶的结构提高 CE 并缓解产生大量碎屑的问题^[66-69],但依旧不能满足 EUV 光源商业化的需求。为进一步减少碎屑、提高 CE,人们开始减小锡靶尺寸。一些光源研发公司将重心落在对液滴锡靶的研究上后取得了较好的结果^[30],目前,ASML 公司^[70-71]和 Gigaphoton 公司^[34]采用的均是液滴锡靶,相关 EUV 产品的 CE 最大可达到 6% 左右。

4.2 液滴的产生

液滴锡靶已成为当前 LPP 方式产生 EUV 光的主流靶材,而液滴锡的产生装置,需要按照一定频率,稳定、连续地产生具有一定间距且大小均匀的液滴,从而使激光辐照锡靶后能稳定获得较高的 CE。目前主要有两种产生液滴的方式^[58,72-74]:按需液滴(DoD)方式和瑞利射流断裂方式,对应的液滴发生器分别为按需液滴发生器和连续液滴流发生器。

按需液滴发生器使用 DoD 方式产生液滴,通常基于一根毛细管设计。该毛细管被带有同心电极的圆柱形压电元件包围,使用电脉冲发生器对压电元件进行驱动,通过改变驱动电压的极性改变毛细管的内部体积,从而挤压出液滴^[20,74-76]。可通过调整脉冲幅值和脉冲持续时间改变液滴的大小、间距及频率,其脉冲频率最高可达几千赫兹^[76]。以一个典型的压电 DoD 液滴发生器为例,其结构如图 5 所示。其中, v 为液滴的流速。在喷嘴后一个充满液体的腔中使用压电材料(圆柱形压电元件包裹毛细管),通过电脉冲信号改变毛细管的体积,最终在喷嘴处发射液滴^[76]。

连续液滴流发生器的原理基于普拉托-瑞利不稳定理论^[72,77],即瑞利射流断裂理论。在液体射流上,波长大于射流周长的小扰动会沿着射流呈指数增长,在柱状射流的表面形成表面波并沿着射流的

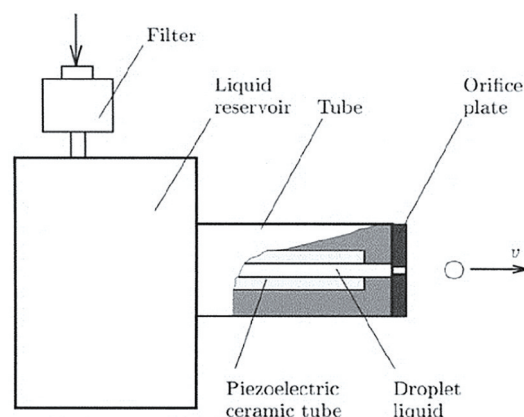


图 5 按需液滴发生器的示意图^[76]

Fig. 5 Schematic diagram of the droplet generator on demand^[76]

轴向传递,当表面波足够大时,柱状射流被拉长成波节并分裂成液滴流^[58,72]。射流中的扰动通常是由噪声引起的,但在光源系统中,为使液滴按照所需频率进行发射,会对其施加人为的扰动。大多数情况下扰动是由周期性电信号驱动的压电振动元件提供^[78],此时由噪声引起的初始扰动可以通过优化等方式变小甚至忽略不计,最终使射流按照施加的扰动信号断裂形成所需的液滴^[58]。

目前满足商业化要求的液滴生成方式为瑞利射流断裂。单分散的液滴既可以由 DoD 液滴发生器产生,也可以由连续的瑞利断裂产生,DoD 方法对于液滴的发射频率有一定限制,难以满足频率大于 10 kHz 的要求^[20],因此,需采用瑞利断裂的方法产生液滴。图 6 为 ASML 公司的液滴发生器示意图,其工作原理^[79]:先在存储器中将锡加热到熔点

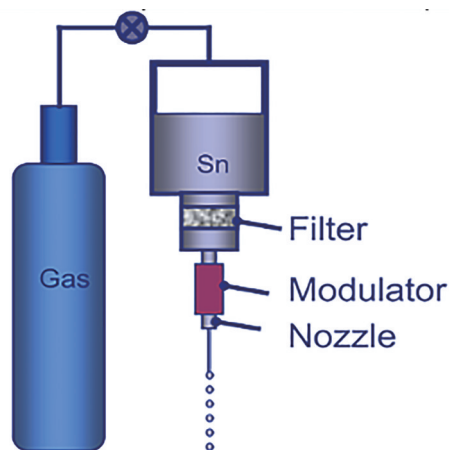


图 6 ASML 公司液滴发生器的示意图^[79]

Fig. 6 Schematic diagram of the droplet generator from ASML company^[79]

以上,然后用惰性气体对熔融锡施加压力,经过滤器后最终到达喷嘴处,并在此处通过压电元件产生的位移振动驱动锡发生扰动,使其生成射流断裂并形成液滴,液滴采用的控制方式为调制波。2017年,ASML公司使用的液滴发生器可以稳定工作700 h^[70]。

4.3 阴影成像系统

为了精确控制靶材大小、下落过程的时空稳定及变形过程,需使用阴影成像系统实时记录下落液滴的状态和变化^[20, 77]。液滴尺寸通常为几十微米,下落速度为几十米每秒,为了忽略相机曝光时间内的液滴运动距离,必须在阴影成像系统中添加 CCD 图像传感器和高速闪光灯^[58, 77-78],如图 7 所示。该闪光灯是一种高功率的 LED 灯,通过对主激光器、CCD 和闪光灯、液滴发生器等系统施加同步触发信号缩短曝光时间,进而对高速运动的微小液滴清晰成像^[77-78]。目前,许多阴影成像系统的 CCD 仅放置在与激光发射方向垂直的方向上。Brandstätter 等^[80]发现在液滴偏移的情况下,一些等离子体动力学和离子发射特性的效应会发生改变,仅记录液滴侧面的阴影图像对于完整分析整个液滴的状态与变化是不全面的,记录液滴正面的变化也是非常必要的。

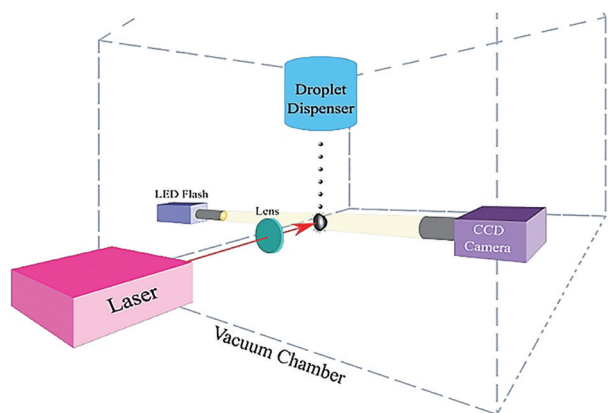


图 7 典型阴影成像系统的布局^[78]

Fig. 7 Layout of the typical shadow imaging system^[78]

5 收集镜的制备

5.1 收集镜极紫外多层膜结构

193 nm 及以上波段光源的光刻机普遍使用折射式光学系统,波长为 13.5 nm 光源的 EUV 光刻机则采用反射式光学系统,这是由极紫外波段材料特性决定的。光与物质的作用可以用材料的复折射

率 \tilde{n} (光学常数) 表示为

$$\tilde{n} = n - ik' = 1 - \delta + i\beta, \quad (3)$$

式中, n 为折射率系数, δ 为折射率小量, k' 和 β 为消光系数,消光系数的大小表示物质对光的吸收强度。对于极紫外光,大部分材料的折射率都接近于 1,若制作 EUV 的折射式透镜,则折射镜的曲率会非常大,且几乎所有物质对 EUV 光都有强吸收作用,透过率较低^[81]。因此, EUVL 系统使用的是反射式结构。

对于反射镜,单一界面在正入射情况下的反射系数可表示为

$$R = (\delta^2 + k'^2) / 4, \quad (4)$$

式中, δ 和 k' 的值都远小于 1。单一界面反射率在正入射时的值很小,不适用于大规模工业制造,单层非掠入射式反射镜同样不适合发展为 EUV 光学系统。受 X 射线衍射和晶体衍射现象的启发,人们仿照布拉格晶体结构制备多层膜使 EUV 波段的光发生衍射以获得高反射率^[81],这种多层膜也称作类一维布拉格晶体。DuMond 等^[82]首次制备了 Au/Cu 多层膜; Spiller^[83]明确提出了使用非吸收材料和吸收材料交替排布制备多层膜的想法; Underwood 等^[84]首次用软 X 射线多层膜实现软 X 射线成像实验,使软 X 射线多层膜技术逐渐走向成熟并开始投入实际应用。

5.2 收集镜多层膜材料的选择

EUV 多层膜材料的选择依据是材料的热动力和决定反射率的光学常数。应用于 X 射线和 EUV 系统的多层膜体系,折射率系数 n 接近于 1,其差别在小数点后两位,这意味着每个界面的反射率最多限制在个位数百分点。为了获得高反射率的交替多层膜,必须使所选材料之间的 δ 差值最大,且尽可能选择小的 β 值^[85]。

13.5 nm 波段经典的材料光学常数如图 8 所示,基于上述原理获得了一种选材原则,即选择图中横坐标距离尽量远的两种材料。对于低 δ 材料, Si 和 Be 是最佳候选,高 δ 材料可以选择 Mo 或 Ru^[85]。而 Ru 具有较高的 β 值且相较 Mo 更易与 Si 发生反应^[86-87],理论上, Be 的 β 值低于 Si,因此, Mo/Be 多层膜的反射率高于 Mo/Si 多层膜,但 Be 有剧毒,且 Mo/Be 需要更多数量的膜层堆叠。

类似于 Scherrer 公式

$$D_{hkl} = \frac{K_s \lambda}{\beta_s \cos \theta_{hkl}}, \quad (5)$$

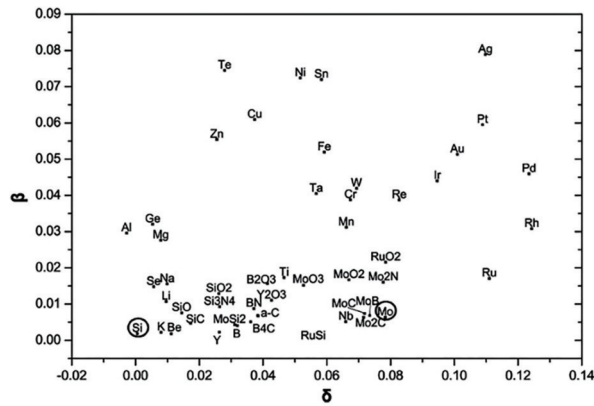


图 8 13.5 nm 下几种元素折射率的实部与虚部^[85]

Fig. 8 Real and imaginary parts of the refractive index of some elements at 13.5 nm^[85]

式中, hkl 为晶面方向, D_{hkl} 为沿垂直晶面方向的晶粒直径, K_s 为 Scherrer 常数, 通常为 0.89。 λ 为入射 X 射线的波长, θ_{hkl} 为布拉格衍射角, β_s 为衍射峰的半峰全宽。

多层膜反射镜的反射带宽与反射膜的层数成反比, 过多的膜层堆叠会使带宽下降。 EUV 光通过收集镜会聚到 IF 点后, 照明投影物镜中用 10 面镜光学系统进行累积通量 (Band pass-integrated throughput), 计算结果表明, Mo/Be 组合对反射率的提高会被膜层增加导致的带宽降低完全抵消, 使 Mo/Be 多层膜光学系统的产量远小于 Mo/Si 多层膜^[88]。 Be 作为一种危险材料, 应用在实验室时需要昂贵的安全防护措施, 因此, Mo/Si 基础体系多层膜是 EUV 光刻系统中反射多层膜的最佳材料组合。 此外, 为了满足系统性能、提升反射率, 通常在 Mo/Si 多层膜体系中引入界面工程技术, 即添加界面阻隔层和保护层, 以防止界面扩散、界面粗糙度和表面氧化导致反射率降低。 界面阻隔层一般选择低原子序数材料, 如 C 和 B_4C , 表面保护层材料一般选择一层超薄氧化物薄膜。

5.3 收集镜多层膜的制备方法

收集镜具有大口径、曲面 (边缘倾斜接近 45°) 的特点, 而在大尺寸曲面基底上制备周期为 50~60 对以上的多层膜时, 膜厚误差达到一个原子量级, 需要超高精度的镀膜技术。 曲面上不同位置的入射角度不同, 因此收集镜表面制备的多层膜厚度从中心到边缘由薄至厚, 呈渐变梯度分布模式。 除膜厚精度需要控制在原子量级外, 镀膜过程还应保证大尺寸横向梯度薄膜控制。 理想情况下, 薄膜呈层状生长, 一层紧贴一层地进行沉积^[89], 更有利于多层

膜界面干涉, 但在非常严苛的环境下只有几种材料组合能满足该要求。 对于金属-金属或金属-半导体材料, Stranki-Krastanov 生长模型^[90]具有普适性, 即岛状生长和层状生长的组合^[91]。 因此, 需给附着原子增加热能或动能提升其表面迁移率, 发生团簇并形成岛。 当这些岛横向生长时, 就会形成一个闭合层, 进而形成光滑的表面。 但新的原子沉积在这些较早形成的岛上并形成新岛, 会造成柱状增长。 为了防止这种现象, 附着在岛顶部的原子需要下降一层^[85], 附着原子需要能量以克服阻止其下降到较低层的 Schwoebel 势垒^[92]。

附着原子通常需要能量形成光滑、致密和封闭层。 但附着原子的能量太高会使层与层之间发生化学反应, 形成化合物的中间界面或导致粒子渗透到上一层, 增强了界面混合。 理想情况下, 在镀膜过程中需要根据不同生长阶段实时调整粒子能量大小: 初始生长阶段的能量较低, 随着层厚的增加, 能量也会逐渐增加^[85]。 目前制备多层膜的方法主要有电子束蒸发、离子束溅射和磁控溅射, 制备过程中的膜层厚度由软 X 射线反射仪控制^[93]。

对于大曲面光学器件的镀膜, 电子束蒸发、离子束抛光和磁控溅射相结合是实现高反射率横向梯度多层膜最合适的沉积方法^[85]。 电子束蒸发与离子束抛光组合在一些设备中已经得到应用。 如由 ASML 公司和卡尔蔡司合作制作的第一代商用 EUV 光刻机 NXE:3100^[94]。 荷兰 FOM 研究所与德国莱博尔德光学公司合作研发的热化粒子磁控管沉积 Mo/Si 多层膜的实验中, 13.5 nm 波长下 EUV 的最高反射率达 70.15%^[95]。 采用磁控溅射技术进行横向梯度多层膜制备的方法较为成熟, 且有大量研究结合实际工艺对矩形和圆形磁控溅射靶源的溅射产额进行分析^[96-98]。 建模仿真后, 进一步通过曲面基底上横向梯度薄膜厚度分布曲线和靶源溅射产额分布函数调整镀膜行星公转速率变化曲线, 实现不同的大面积曲面镀膜。 该方法被广泛应用于大面积曲面镀膜, 有效提高了镀膜效率。 采用磁控溅射快速掠靶转动的方式, 也有利于界面层和表面保护层制备时的厚度控制。

6 高 CE 技术与收集镜的寿命维护

6.1 高 CE 技术

除改变驱动光源波长的方法外, 还可以从双激光脉冲作用、激发光光场的时空 (完美波形) 控制、

锡靶大小形状及激发光射击锡靶过程的时空同步控制^[25,30,34,99-100]等方面提高 CE。

ASML 公司通过实验发现加入预脉冲可以极大地提高 CE, 如图 9 所示。先用预脉冲照射锡靶, 产生低密度、碎片化的锡靶。设计好延时时间后, 再用高功率的主脉冲冲击打锡靶, 最终产生高密度、高温的等离子体并辐射 EUV 光, 如图 10 所示。该方案可以提高主脉冲和锡靶的利用率、释放更多的 EUV 光。ASML 公司利用该方法最高可得到约 6% 的转换效率^[35]。

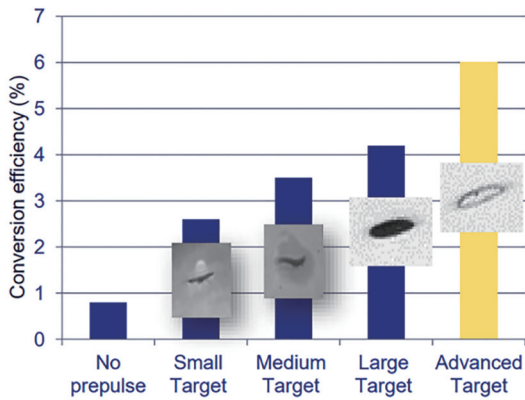


图 9 预脉冲作用后不同锡靶形貌对应的 CE^[35]

Fig. 9 CE of different target profile created by pre-pulse^[35]

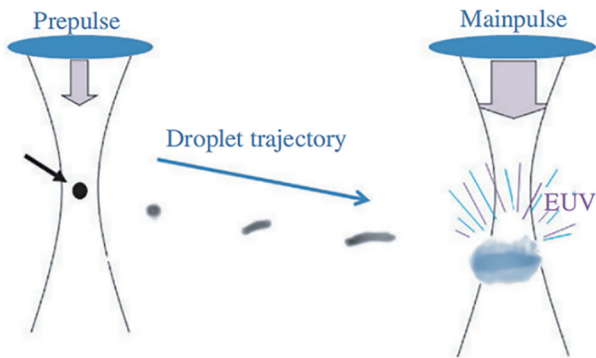


图 10 双脉冲作用效果的示意图^[25]

Fig. 10 Schematic diagram of the effect of double pulse effect^[25]

临界等离子体密度 n_c 与驱动光源波长 λ_L 满足

$$n_c = 1.12 \times 10^{12} (1/\lambda_L)^2. \quad (6)$$

如 10 μm 激光相应的等离子体临界密度比 1 μm 产生的等离子体临界密度小两个数量级^[34]。在预脉冲激光的选择上, 相比 CO_2 激光, 用波长更短的 Nd:YAG 激光可以产生更高的临界等离子体密度, 辐射更高能量的 EUV 光, 且 Nd:YAG 激光具有更强的穿透能力, 能使预脉冲冲击打靶材的气化率更

高^[30,101]。Gigaphoton 公司的预脉冲采用 1064 nm 的 Nd:YAG 激光, 原因是相比 266 nm 的激光, 1064 nm 激光产生的碎屑粒子动能更低、离子碎屑更少, 对收集镜寿命的影响更小^[30,34,102]。此外, 用预脉冲优化靶材的密度和形貌也极大影响着 CE。用 ps 级预脉冲作用靶材, 击打靶材后的雾化效率会更好, 获得的 CE 也更高^[34,103]。Gigaphoton 公司使用 ns 级脉冲作用靶材后, 形成高密度圆盘状, CE 仅为 2.5%; 而 ps 级脉冲作用后, 得到了低密度穹顶状靶材分布, CE 达到 4.5%^[34], 2021 年时, CE 高达 6%^[13], 且电离率高达 98%^[34], 如图 11、图 12 所示。

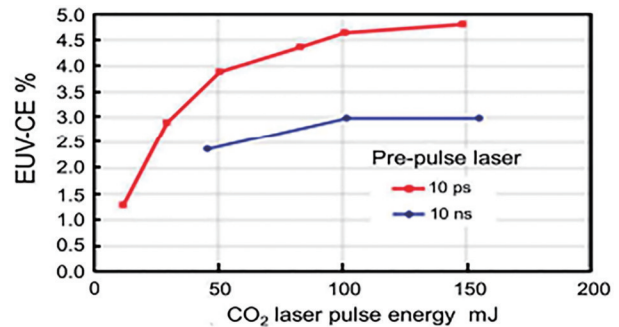


图 11 不同预脉冲下 CE 随 CO_2 激光脉冲能量的变化曲线^[13]

Fig. 11 Variation curve of CE with CO_2 laser pulse energy for different pre-pulses^[13]

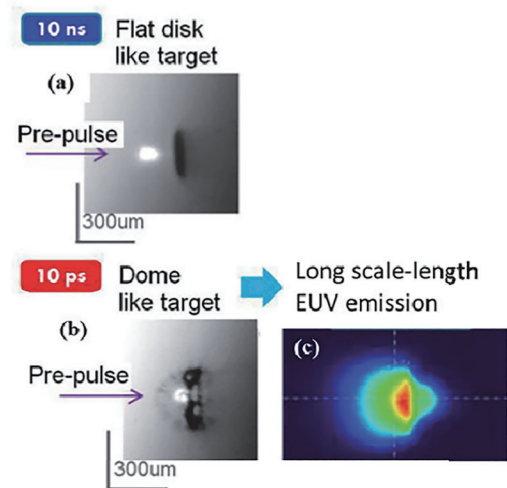


图 12 不同时域宽度的预脉冲冲击打靶材结果对比。(a) ns 预脉冲的作用结果; (b) ps 预脉冲的作用结果; (c) EUV 辐射^[34]

Fig. 12 Target expansion created by different pulse length of pre-pulse. (a) Effect created by ns pre-pulse; (b) effect created by ps pre-pulse; (c) EUV emission^[34]

激发光光场的时空(完美波形)控制:空间上,CO₂激光在传输过程中经常因能量太高(热效应)使光学镜发生变形,变形后的光学镜会加剧光在传输过程的散射和衍射现象。散射和衍射也意味着光束轮廓发生变形和光束尺寸发生变化。传输光的尺寸偏大会导致激光透出传输光路,从而损失激光功率。传输光的尺寸偏小会使激光密度变大,当能量密度超过其损伤阈值时就会损害光学镜。基于这些因素的影响^[34],Gigaphoton公司在光束传输路

径中引入高速扩束器(BEX)控制系统。通过对光束尺寸轮廓的监测与调制输出稳定优良的激发光^[13, 34],如图 13 所示。图 13(a)为初始状态光束轮廓,图 13(b)为不使用 BEX 下 2 s 后的光束分布,图 13(c)是在光束传输系统中引入 BEX 的效果。对比发现,引入 BEX 系统可以对光束尺寸进行实时监控,在传输过程中保持合理的光束尺寸,如图 14 所示。最终发射质量优良的激发光、更理想地击打靶材并产生更高能量的 EUV 光。

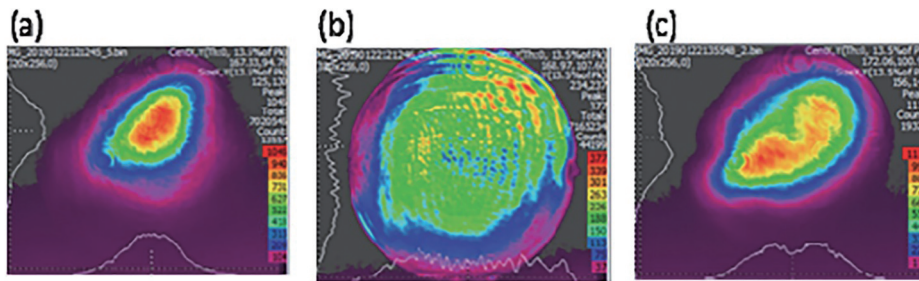


图 13 BTS 中 CO₂ 激光束的空间分布。(a) 初始状态; (b) 不使用 BEX; (c) 使用 BEX^[34]

Fig. 13 Spatial distribution of the CO₂ laser beam in the BTS. (a) Initial state; (b) not using BEX; (c) using BEX^[34]

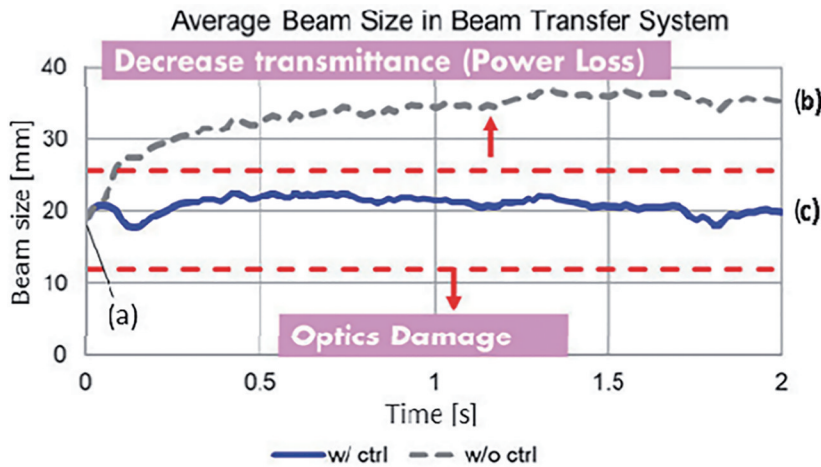


图 14 不同状态下 CO₂ 激光束的尺寸控制结果^[34]

Fig. 14 Comparison of CO₂ beam size evolution for different conditions^[34]

时间上主脉冲前的“基座能量”是由 CO₂ 激光的种子激光器偏振器件消光比的有限性、电光器件漏电导致。图 15(a)为抑制前后锡靶的形貌,其中,左图为抑制前的图像,右图为抑制后的图像。可以发现,抑制前“基座能量”对应的能量较低,击打靶材后形貌呈卷须拉丝状,会造成 CE 下降。采用电光调制器抑制后,“基座能量”被调制到一定阈值水平以下^[38]。抑制后的 CO₂ 激光脉冲击打锡靶呈饼状,对应的 CE 也更高。此外,还需控制好脉冲击打锡靶的时间,使每束脉冲都能在功率峰值处击打液态

锡^[25, 104-105],最终获得较高的 CE、辐射更多的 EUV 光,如图 15(b)所示。

锡靶的形状、大小及下落时空特性均会影响 CE。锡靶的最佳大小是由发射所需的锡原子最小数量决定^[34]。通过缩小液滴锡靶的尺寸可以减少光学镜上的碎屑沉积、延长光学镜的寿命,但过小的尺寸会影响锡液滴经预脉冲辐射膨胀后的尺寸,最终出现无法与主脉冲形成最佳耦合等问题^[106-107]。如 10 μm 的锡液滴经过脉冲辐射后能被完全气化,然而每个脉冲产生的 EUV 能量却比利用 50 μm 的

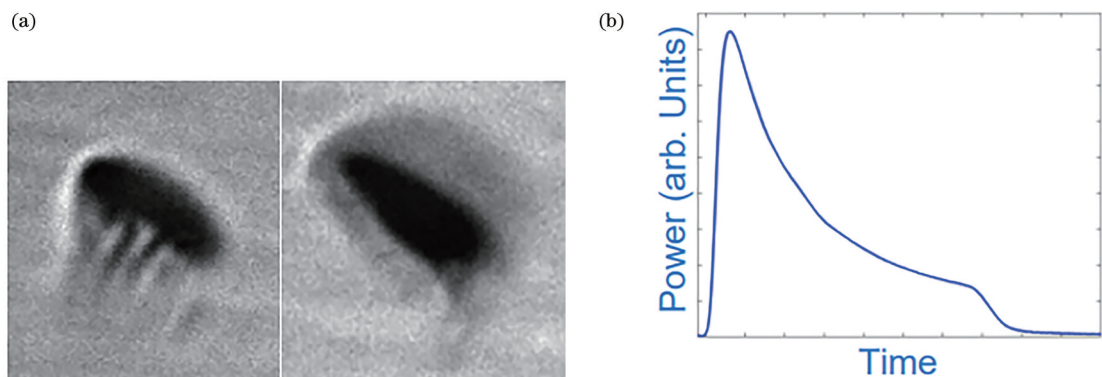


图 15 基座对锡靶形貌的影响。(a)抑制前后的锡靶形貌;(b)基座抑制后激光的脉冲功率^[35]

Fig. 15 Influence of the pedestal on the profile of the tin target. (a) Profile of the tin target before and after suppression; (b) laser temporal profile after pedestal suppression^[35]

液滴小了近 30 倍^[20]。因此,用于有效产生 EUV 光的液滴尺寸直径至少应为 $20\ \mu\text{m}$ ^[100, 107],通常为 $20\sim 120\ \mu\text{m}$ ^[58],即液滴大小的选择实际上是对碎屑数量和每个脉冲产生 EUV 能量之间的权衡^[20]。此外,对于尺寸较小的液滴锡靶,为了使其产生的极紫外光满足 EUV 光源标准并进行大规模生产,需要激光脉冲和液滴发射达到非常高的重复频率(二者通常为整数倍关系),进一步增加了设备的制造难度,也会使 EUV 产生区域出现碎屑累积问题^[20, 102]。目前,ASML 公司 LPP 光源采用的液滴尺寸约为 $27\ \mu\text{m}$,液滴发射频率为 $50\ \text{kHz}$ ^[58, 70, 79];Gigaphoton

公司的 LPP 光源采用的液滴尺寸为 $20\ \mu\text{m}$,频率为 $100\ \text{kHz}$ ^[34, 58]。

在极紫外光源技术中使用的液滴产生方式为瑞利射流断裂方式。液滴经过挤压后,其形状在长椭球和扁椭球之间发生振幅衰减振荡,最终演化成一个小球体^[72, 105],如图 16 所示。但关于瑞利射流断裂方式下的液滴形状演变与其上游参数之间关系的研究较少。Hu 等^[72]对液滴变形特性与液滴发生源之间的关系进行了详细研究,在 EUV 光源的液滴发生器中,当受到激光脉冲辐照的液滴为球形时,可进一步提升极紫外光转换效率、减少碎屑。

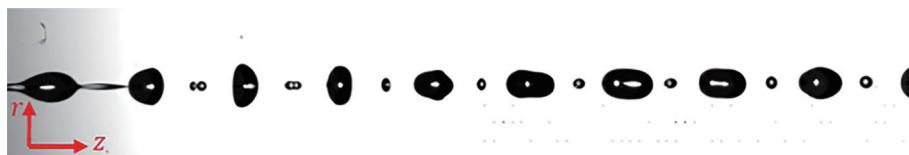
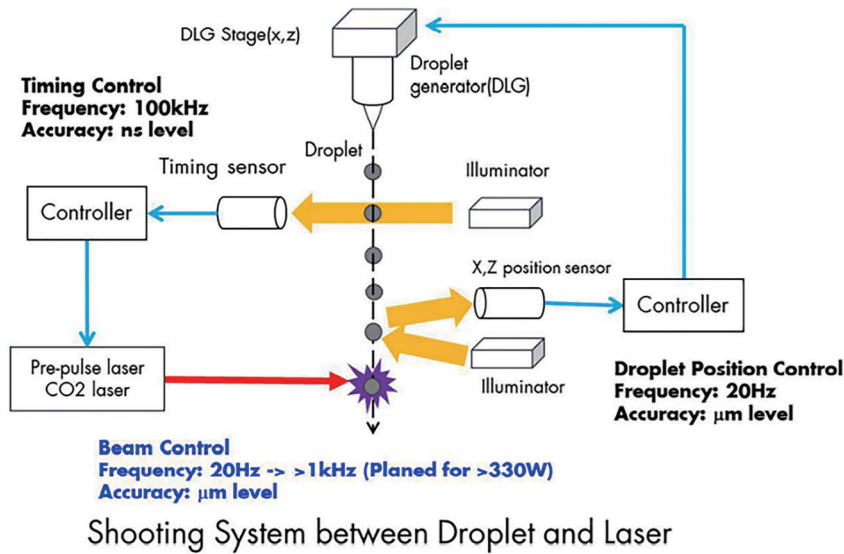
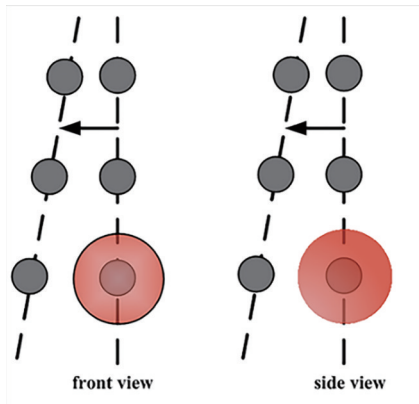


图 16 6 kHz 扰动下由瑞利断裂产生的液滴流^[72]

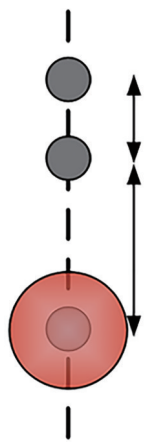
Fig. 16 Droplet generated by 6 kHz signal based on Rayleigh jet breakup^[72]

为了稳定获得较高的 CE,必须很好地控制 EUV 锡靶剂量等关键技术,确保激光射击雾滴的精度能够达到 μm 级空间同步和 ns 级时间同步^[34]。激光射击靶材的时空同步控制如图 17 所示,射击控制回路主要包括液滴位置控制、激光束轴控制和定时控制。高速激光束轴控制系统,对液滴下落位置进行有效捕捉并反馈给定时系统和液滴生成器控制系统。液滴生成器控制系统根据反馈信息进行相应调控,确保液滴始终高速竖直下落。定时控制器收到反馈信息后再调控预脉冲(PP)和主脉冲(MP)之间的发射延迟时间,最终的射击精度控制在 $\pm 2\ \mu\text{m}$ 范围内,防止破片产生且能获得较高的等离子体密度^[24, 34]。

LPP 方式产生的光源能否稳定输出的关键在于激光脉冲与液滴锡靶相互作用的时空稳定性,最重要的影响因素之一就是液滴锡的稳定性^[58],可将稳定性分为横向不稳定和纵向不稳定。横向不稳定指液滴在垂直于液滴序列的空间位置出现漂移,该现象会导致激光辐照液滴锡靶时发生错位,使光源的输出能量产生波动^[20],如图 18 所示。以标准偏差 σ 作为对液滴位置稳定性的衡量标准,对于发射频率为 $100\ \text{kHz}$,速度超过 $50\ \text{m/s}$ 的液滴,一般要求其液滴位置的稳定性 $\sigma \approx 5\ \mu\text{m}$ ^[77]。目前,ASML 公司可达到的 $\approx 1\ \mu\text{m}$ ^[79]。纵向不稳定指液滴沿着液滴序列的空间位置漂移,会导致液滴间距发生变化,液滴不再以恒定的速度通过激光焦点,产生液

图 17 液滴位置传感与控制原理^[13]Fig. 17 Sensing and control scheme of the droplet position^[13]图 18 液滴的横向不稳定^[20]Fig. 18 Horizontal instability of the droplet^[20]

滴和激光脉冲之间的不同步问题,即时间抖动^[78, 105],如图 19 所示。原因是预脉冲作用锡液滴后

图 19 液滴的纵向不稳定^[20]Fig. 19 Vertical instability of the droplet^[20]

产生的等离子体在 EUV 腔室中产生的冲击波,影响了后续液滴的位置,因此,液滴的间距必须大于等离子体的影响区域。ASML 公司、Gigaphoton 公司将液滴间距控制在 1000 μm 以上以避免相邻液滴的扰动^[34]。

6.2 光源污染与防护

6.2.1 光源污染来源

光源污染主要有碳污染、氧化污染和碎屑污染。氧化污染贯穿使用前和使用过程。碳污染和碎屑污染主要是使用过程带来的。因此,提升收集镜反射率需在制备过程中引入超高真空环境和抗氧化层。EUV 光刻机中收集镜距锡靶很近,在运行过程中会对 Mo/Si 多层膜光学元件表面造成污染,降低收集镜的反射率及使用寿命,影响光刻机的正常使用^[108]。

碳污染是一种光致沉积现象^[109],主要过程为真空腔中的碳氢化合物吸附在多层膜表面,被 EUV 光辐照多层膜表面产生的次级电子分解,最终在表面形成碳污染。氧污染对多层膜的反射率影响很大,存在氧污染时多层膜的反射率只有 30%~50%。一方面,在装载样品的过程中真空室会暴露在大气环境中,真空腔壁会吸附气体和杂质,这些物质如果在镀膜过程中进入膜层,会影响薄膜质量和组分。另一方面,光刻机真空腔中残留的水分子经 EUV 光辐射,氢氧键断裂,氧原子与多层膜表面或者表层物质反生氧化反应生成氧化物,形成的氧化物会吸收大量极紫外光^[110],从而导致多层膜的反射率下降。LPP 在满足商业化光刻机对光源的需

求外,也会带来一定的碎屑污染^[111]。这些碎屑包括激光打靶产生的高能离子、中性粒子、由液体或固体燃料碎片组成的中性团簇,碎屑会附着在反射镜表面,造成污染并明显降低其反射率和使用寿命,有些碎屑甚至会直接烧蚀膜层表面。

6.2.2 防护措施

碳污染清洗技术包括等离子体清洗技术、活性氧清洗技术和原子氢清洗技术等。等离子体清洗技术是利用等离子体激发源激发工作气体,生成具有活性的等离子体,等离子体与碳污染发生化学反应生成易挥发的物质,碳元素以易挥发化合物的形式离开光学元件的表面,从而清洗多层膜表面的碳污染^[110]。该方法的清洗速率快,但容易形成氧化物污染且成本较高。活性氧清洗技术是指利用真空紫外(VUV)或者 EUV 光直接辐照工作气体 O₂,生成具有强氧化性的氧自由基和臭氧分子,与表面碳污染层发生化学反应生成易挥发物质 CO、CO₂等,以清洗多层膜表面碳污染^[110]。该方法可以进行在线清洗,清洗速率较快,但会氧化反射镜表面甚至增加反射镜表面的粗糙度。

Graham 等^[112]最早利用高温钨丝将工作气体 H₂ 裂解为原子氢,与碳相互作用生成易挥发的小分子碳氢化合物 CH₃、CH₄等,从而清理了碳污染。该方法的清洗速率较慢,但对光学元件产生的二次污染较小。外保护层的主要作用是防氧化,一些具有催化作用的氧化物薄膜如氧化钛具有疏水性,可用来减缓表面污染物沉积,覆盖外保护层包括 Ru 和 TiO₂、RuO₂、ZrO₂等氧化物复合保护层。Bajt 等^[113]研究了 Ru 作为覆盖保护层的特性,结果表明,在相同条件下,Ru 覆盖层的寿命大约为 Si 层的 40 倍。Yulin^[114]对比研究了 Si、TiO₂、RuO₂覆盖层材料的性能,结果表明,TiO₂和 RuO₂保护层在强 EUV 光的照射下具有优良的抗氧化性和稳定性,高反射性和较强的辐射稳定性为将其作为成像光学元件提供了参考。

碎屑缓解技术目前常用的缓解碎屑方法有缓冲气体法和磁场法。Harilal 等^[111]将两种方法及两种方法的组合分别进行对比,结果表明,不同压强的氩气、氦气和氢气对动能小于 5 keV 的碎屑均有着很强的阻挡作用,对带内光子辐射的吸收作用却微乎其微。有限的磁场可以减缓碎屑的飞行速度但无法完全阻挡其到达收集镜表面,而缓冲气体和磁场的组合可以最大程度地减缓碎屑的飞行速度,

还能减小缓冲气体的压强,且对光子辐射的吸收最小。目前,ASML 公司市面出售的 EUV 光刻机是利用充入缓冲气体去除碎屑,而 Gigaphoton 公司推出的光源系统则通过冲入缓冲气体和外加磁场组合的方式去除碎屑。

7 结 论

光刻光源经过五代的发展,目前最先进的 EUVL 采用 13.5 nm 的极紫外光源,是实现 7 nm 以下工艺节点的关键光刻技术。DUVL 至 EUVL 的发展过程中,分辨率大幅度提高的同时也减少了光刻机的曝光次数,大大降低了光刻成本^[115]。但现有 EUVL 尚未完善,并不能够完全占领市场。EUV 光刻机仅在部分工序中得到了应用,仍需与 DUV 光刻机配合使用。

目前,ASML 公司使用重复频率为 50 kHz、功率为 21.5 kW 的 CO₂ 激发光产生 250 W 稳定的 EUV 光输出,可用于 7 nm 节点光刻曝光。对于未来 3 nm 及其以下节点的曝光光刻,EUV 光源的功率至少需要 500 W,EUV 光源技术仍有较大的提升和改进空间。如何进一步提高 CO₂ 激光的平均功率、提升 CE 以及光源的稳定性和寿命仍是相关领域内需要解决的问题。为获得高重频、短脉冲、大功率的 CO₂ 种子光,MOPA 技术的放大与隔离方面仍存在很多问题。如 SF₆ 隔离器的弛豫时间慢、插入损失大,石墨烯用作隔离方面损伤阈值低,后续需要寻找损伤阈值高、吸收系数大、漂白透过率高、上能级弛豫时间更快的新型二维材料。其次,需要对液滴锡靶进行优化。随着液滴尺寸的进一步减小,对装置的时空稳定性提出了更高的要求,国际上广泛采用的带电偏转装置与上海光机所提出的激光束引导方式为未来实现液滴锡靶发生器的时空稳定性提供了不同的方案^[116]。对于液滴辐照特性也可以开展研究:1)使用合金或新型材料作为靶材提高 CE;2)Brandstätter 等^[117]对非轴对称液滴辐照的研究发现,用非对称镜面的配置时液滴目标的故意偏移可以获得更高的 EUV 输出,但国内关于非轴对称液滴辐照方面的相关研究较少。多层膜沉积工艺参数优化的关键是提高多层膜的界面质量,如何在大口径大陡度曲面基底上优化多层膜工艺参数,控制好膜厚梯度,并制备出高性能的梯度多层膜将是未来研究的重要方向^[96]。

为了提高自主研发高性能芯片的能力,我国已

经开始了 EUVL 研究。武汉光谷科威晶与华科联合承担项目“7000 W 轴快流 CO₂ 激光器”已顺利通过验收,并达到了国际先进水平,形成 1 kW–10 kW 快轴流 CO₂ 激光器系列产品,未来还将朝着高功率高纯度径向偏振快轴流 CO₂ 激光器方向发展^[118]。华中科技大学成功研制了功率为 2 kW、5 kW、10 kW 等一系列横流 CO₂ 激光器并成功商业化推广高功率横流 CO₂ 激光器加工系统 100 余台套^[119]。潘其坤等^[120]提出了一种激光功率稳定方法及激光功率放大系统,有效提升了 CO₂ 激光放大功率后输出的窄脉宽激光功率及各脉冲能量的稳定性。之后,该团队又提出了一种双波长激光共轴输出系统,解决了现阶段可调谐 CO₂ 激光器无法同时输出双波长的难题,同时提升了 EUV 光刻光源中双波长 CO₂ 激光在 MOPA 系统中的功率提取效率和双波长 CO₂ 激光光束质量、偏振度、传输方向的一致性^[121-122]。上海光机所提出了一种用于 EUV 光源的熔融液滴发生装置,随后又提出了一种用于 EUV 光源中液滴靶的一体化锡原料罐装系统,该系统可获得更加均匀的熔融锡,且其集成化程度高,操作安全方便,适用于 EUV 光源锡原料的罐装^[123-124]。尹培琪等^[125]对激光脉冲辐照液滴后产生的等离子体特性展开了广泛的研究,并采用直接成像法和阴影法对 Nd:YAG 激光诱导水滴等离子体展开实验研究,分析了液滴等离子体羽辉膨胀特性及激光作用液滴的运动情况。孙秦等^[126]对脉冲激光辐照锡等离子体特性的诊断方法展开了研究,用朗缪尔探针获得不同激光能量下辐照产生的锡等离子体电子温度和电子密度的时间演化。齐乐华等^[127]对液滴的均匀产生及形态变化展开了研究,通过对均匀液滴喷射过程展开的数值模拟与实验研究,发现液滴射流速度主要取决于喷射压强,液滴流均匀性主要取决于扰动频率和扰动振幅,射流的压力场则呈周期性变化的规律。肖渊等^[128]采用自行研制的金属微滴发生系统,分析了液滴产生器喷嘴壁附着杂质对喷射稳定性的影响以及工艺参数对微滴均匀性的影响,对于连续液滴流发生器的研制有一定的参考价值。王占山等^[129]研制了适用于 13.5 nm 极紫外光的 Mo/Si 多层膜球面镜,其口径为 125 mm,曲面半径为 143 mm,球面镜多层膜厚度的均匀性达到 0.8% 以下,镀制的最大近正入射圆形反射镜口径为 300 mm。上海光机所于 2011 年成功制得 13.5 nm 极紫外反射镜,其测试反射率为 67.8%,接近理论最高值

73.7%^[130]。王珣等^[131]采用反应磁控溅射工艺,结合溅射电压与氧气流量组成的“迟滞回线”关系,制备出纯度、粗糙度、致密度和均匀性都十分优异的金属氧化保护层。孙诗壮等^[132]使用分子动力学模型模拟 Mo/Si 原子沉积过程中发生反射和再溅射的概率,并通过磁控溅射实验在不同倾斜角度基底上制备了多层膜样片,验证了模拟模型的仿真结论。孙诗壮等^[133]得到了气压和靶-基底间距与膜表面粗糙度的关系。如今正处于 DUV 向 EUV 光刻的升级转化,通过国内研究人员的不断努力,积极学习与借鉴国外先进技术,加之强大的综合国力支持,我国的光刻技术和半导体产业必将进入发展的快车道并逐步缩短与国际先进水平的差距。

参 考 文 献

- [1] Moore G E. The future of integrated electronics[EB/OL]. (1965-08-19) [2022-01-18]. <https://www.computerhistory.org/collections/catalog/102770836>.
- [2] Rayleigh J W S. The theory of sound[M]. New York: Dover Publications, 1945.
- [3] 李艳秋. 光刻机的演变及今后发展趋势[J]. 微细加工技术, 2003(2): 1-5, 11.
Li Y Q. Lithography tool evolution and the trend of its development[J]. Microfabrication Technology, 2003(2): 1-5, 11.
- [4] 楼祺洪, 袁志军, 张海波. 光刻技术的历史与现状[J]. 科学, 2017, 69(3): 32-36.
Lou Q H, Yuan Z J, Zhang H B. The history and current status of lithography[J]. Science, 2017, 69(3): 32-36.
- [5] Blumenstock G M, Meinert C, Farrar N R, et al. Evolution of light source technology to support immersion and EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5645: 188-195.
- [6] Levinson H J. Principles of lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2005.
- [7] Lin B J. The future of subhalf-micrometer optical lithography[J]. Microelectronic Engineering, 1987, 6(1/2/3/4): 31-51.
- [8] van Schoot J, Troost K, Bornebroek F, et al. High-NA EUV lithography enabling Moore's law in the next decade[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10450: 104500U.
- [9] Fomenkov I. EUV source for lithography in HVM: performance and prospects[EB/OL]. (2019-11-5) [2022-01-18]. <https://www.euvlitho.com/2019/S1.pdf>.
- [10] Brandt D C, Fomenkov I V, Graham M.

- Performance and availability of EUV sources in high volume manufacturing on multiple nodes in the field and advances in source power[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11854: 118540J.
- [11] 孔军. 荷兰 ASML 出价 26 亿美元收购 Cymer[EB/OL]. (2012-10-17)[2022-01-18]. <https://finance.qq.com/a/20121017/006391.htm>.
Kong J. Netherlands ASML bid \$2.6 billion for Cymer[EB/OL]. (2012-10-17)[2022-01-18]. <https://finance.qq.com/a/20121017/006391.htm>.
- [12] ASML. EUV Lithography Systems TWINSCAN NXE3600D[EB/OL]. [2022-01-18]. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twincan-nxe-3600d>.
- [13] Mizoguchi H, Tomuro H, Nishimura Y, et al. Update of >300 W high power LPP-EUV source challenge IV for semiconductor HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11854: 118540K.
- [14] Mainfray G, Manus G. Multiphoton ionization of atoms[J]. Reports on Progress in Physics, 1991, 54(10): 1333-1372.
- [15] Johnston T W, Dawson J M. Correct values for high-frequency power absorption by inverse bremsstrahlung in plasmas[J]. The Physics of Fluids, 1973, 16(5): 722.
- [16] Wannier G H. Statistical physics[M]. New York: Dover Publications, 1987: 197-203.
- [17] Nishimura H, Fujioka S, Shimomura M, et al. Development of extreme-ultraviolet light source by laser-produced plasma[J]. The Review of Laser Engineering, 2008, 36(APLS): 1125-1128.
- [18] Brandt D C, Fomenkov I V, Ershov A I, et al. LPP source system development for HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7271: 40-49.
- [19] Fomenkov I. EUV source for lithography: readiness for HVM and outlook for increase in power and availability[EB/OL]. (2018-11-07) [2022-01-18]. <https://www.euvlitho.com/2018/S1.pdf>.
- [20] Rollinger B. Droplet target for laser-produced plasma light sources[D]. Zürich: ETH Zürich, 2012.
- [21] Poirier M, Blenski T, de Gaufridy de Dortan F, et al. Modeling of EUV emission from xenon and tin plasma sources for nanolithography[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006, 99(1/2/3): 482-492.
- [22] van de Kerkhof M A, Liu F, Meeuwissen M, et al. Spectral purity performance of high-power EUV systems[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11323: 1132321.
- [23] Mizoguchi H, Nakarai H, Abe T, et al. High power LPP-EUV source with long collector mirror lifetime for high volume semiconductor manufacturing[C]//2018 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), March 11-12, 2018, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2018: 17805561.
- [24] Brandt D C, Purvis M, Fomenkov I, et al. Advances toward high power EUV sources for EUVL scanners for HVM in the next decade and beyond[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11609: 116091E.
- [25] Bakshi V. EUV lithography[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2018.
- [26] Aota T, Nakai Y, Fujioka S, et al. Characterization of extreme ultraviolet emission from tin-droplets irradiated with Nd:YAG laser plasmas[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112(4): 042064.
- [27] Ando T, Fujioka S, Nishimura H, et al. Optimum laser pulse duration for efficient extreme ultraviolet light generation from laser-produced tin plasmas[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(15): 151501.
- [28] Harilal S S, Tillack M S, Tao Y, et al. Extreme-ultraviolet spectral purity and magnetic ion debris mitigation by use of low-density tin targets[J]. Optics Letters, 2006, 31(10): 1549-1551.
- [29] Banine V Y, Koshelev K N, Swinkels G M. Physical processes in EUV sources for microlithography[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(25): 253001.
- [30] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42.
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [31] 吴晗平. 激光光束质量的评价与应用分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(2): 128-132.
Wu H P. Evaluation and applied analysis of laser beam quality[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(2): 128-132.
- [32] Endo A, Abe T, Hoshino H, et al. CO₂ laser-produced Sn plasma as the solution for high-volume manufacturing EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6703: 55-62.
- [33] Endo A, Komori H, Ueno Y, et al. Laser-produced plasma source development for EUV lithography [C]//Alternative Lithographic Technologies. SPIE,

- 2009, 7271: 86-92.
- [34] Niimi G, Nagai S, Hori T, et al. Update of development progress of the high power LPP-EUV light source using a magnetic field[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11323: 1132328.
- [35] Michael P. An introduction to EUV sources for lithography[EB/OL]. (2019-09-25)[2022-01-18]. https://strobe.colorado.edu/wp-content/uploads/STROBE_ASML-EUV-Sources_Purvis_25-Sept-2020-1.pdf.
- [36] 杨泽后. 电光调 Q 及腔倒空射频激励波导 CO₂ 激光器[D]. 成都: 四川大学, 2005.
Yang Z H. Electric-optically Q-switched and cavity-dumped RF waveguide CO₂ laser[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [37] 周丹丹, 尹兴良, 王煜, 等. 914 nm LD 抽运高效率腔倒空电光调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101014.
Zhou D D, Yin X L, Wang Y, et al. High-efficiency electro-optical cavity-dumped Q-switched laser pumped by LD at 914 nm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101014.
- [38] 张冉冉. 短脉冲 CO₂ 激光放大与噪声光隔离技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.
Zhang R R. Study on technology of short pulse CO₂ laser amplification and noise isolation[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [39] Nowak K, Ohta T, Suganuma T, et al. CO₂ laser drives extreme ultraviolet nano-lithography: second life of mature laser technology[J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4): 345-354.
- [40] Mizoguchi H, Nakarai H, Abe T, et al. Performance of one hundred watt HVM LPP-EUV source[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94220C.
- [41] 张自豪. 大功率声光调 Q CO₂ 激光器研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Zhang Z H. Numerical and experimental study of high power acousto-optically Q-switched CO₂ laser [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [42] 胡志. 轴快流 CO₂ 激光放大器增益性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
Hu Z. Study on the gain properties of fast axial flow CO₂ laser amplifier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [43] 易翔宇. CO₂ 激光的主振放大系统的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Yi X Y. Research of CO₂ laser MOPA system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [44] 黄鸿雁. 高功率轴快流 CO₂ 激光器气体流场及热交换的模拟与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
Huang H Y. The simulation and optimization of the gas flow field and heat exchanging of the high power fast axial flow CO₂ laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
- [45] Polyanskiy M N, Babzien M, Pogorelsky I V. Chirped-pulse amplification in a CO₂ laser[J]. Optica, 2015, 2(8): 675-681.
- [46] Feldman B J. Multiline short pulse amplification and compression in high gain CO₂ laser amplifiers[J]. Optics Communications, 1975, 14(1): 13-16.
- [47] Baeva M G, Atanasov P A. Numerical investigation of CW CO₂ laser with a fast turbulent flow[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(4): 546-551.
- [48] Muller S, Uhlenbusch J. Influence of turbulence and convection on the output of a high-power CO₂ laser with a fast axial flow[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1987, 20(6): 697-708.
- [49] Park D, Jeong J, Yu T J. Optimization of the pulse width and injection time in a double-pass laser amplifier[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e60.
- [50] Jeong J, Cho S, Yu T J. Numerical extension of Frantz-Nodvik equation for double-pass amplifiers with pulse overlap[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3946-3953.
- [51] Frantz L M, Nodvik J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. Journal of Applied Physics, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [52] Brunet H. Saturation of infrared absorption in SF₆[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1970, 6(11): 678-684.
- [53] Huang P, Houver S, Berger C, et al. Saturable absorption in multilayer epitaxial graphene driven by mid-infrared quantum cascade lasers[C]//2017 42nd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), August 27-September 1, 2017, Cancun, Mexico. New York: IEEE Press, 2017: 17259274.
- [54] Hercher M. An analysis of saturable absorbers[J]. Applied Optics, 1967, 6(5): 947-954.
- [55] 何京良, 侯玮, 张恒利, 等. LD 抽运 Nd:YVO₄ 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器[J]. 中国激光, 2000,

- 27(6): 481-484.
- He J L, Hou W, Zhang H L, et al. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd: YVO₄ laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(6): 481-484.
- [56] Schriever G, Mager S, Naweed A, et al. Laser-produced lithium plasma as a narrow-band extended ultraviolet radiation source for photoelectron spectroscopy [J]. Applied Optics, 1998, 37(7): 1243-1248.
- [57] Nagano A, Inoue T, Nica P E, et al. Extreme ultraviolet source using a forced recombination process in lithium plasma generated by a pulsed laser [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(15): 151502.
- [58] 陈鸿. 液滴锡靶激光等离子体碎屑和极紫外辐射特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- Chen H. Studies on characteristics of ion debris and extreme ultraviolet emission in laser produced tin droplet plasma[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [59] Rajyaguru C, Higashiguchi T, Koga M, et al. Parametric optimization of a narrow-band 13.5-nm emission from a Li-based liquid-jet target using dual nano-second laser pulses[J]. Applied Physics B, 2005, 80(4/5): 409-412.
- [60] Higashiguchi T, Kawasaki K, Sasaki W, et al. Enhancement of extreme ultraviolet emission from a lithium plasma by use of dual laser pulses[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(16): 161502.
- [61] 沈云峰, 高城, 曾交龙. Xe¹⁰⁺离子 EUV 发射谱的理论研究 [J]. 原子与分子物理学报, 2007, 24(S1): 36-38.
- Shen Y F, Gao C, Zeng J L. A theoretical study of EUV emission spectra of Xe¹⁰⁺ ions[J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2007, 24(S1): 36-38.
- [62] Ueno Y, Ariga T, Soumagne G, et al. Efficient extreme ultraviolet plasma source generated by a CO₂ laser and a liquid xenon microjet target[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(19): 191503.
- [63] Sasaki A, Nishihara K, Murakami M, et al. Effect of the satellite lines and opacity on the extreme ultraviolet emission from high-density Xe plasmas[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(24): 5857-5859.
- [64] Kalmykov S G, Butorin P S, Sasin M E. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11 nm: optimization and conversion efficiency[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(10): 103301.
- [65] White J, Hayden P, Dunne P, et al. Simplified modeling of 13.5 nm unresolved transition array emission of a Sn plasma and comparison with experiment[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11): 113301.
- [66] Tomie T, Aota T, Ueno Y, et al. Use of tin as a plasma source material for high conversion efficiency [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5037: 147-155.
- [67] Tao Y, Nishimura H, Okuno T, et al. Dynamic imaging of 13.5 nm extreme ultraviolet emission from laser-produced Sn plasmas[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(24): 241502.
- [68] Harilal S S, Sizyuk T, Sizyuk V, et al. Efficient laser-produced plasma extreme ultraviolet sources using grooved Sn targets[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 111503.
- [69] Cummins T, O'Gorman C, Dunne P, et al. Colliding laser-produced plasmas as targets for laser-generated extreme ultraviolet sources[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(4): 044101.
- [70] Fomenkov I. EUV source for high volume manufacturing: performance at 250 W and key technologies for power scaling[EB/OL]. (2017-11-07) [2022-01-18]. <https://www.euvlitho.com/2017/S1.pdf>.
- [71] Brandt D C, Fomenkov I V, Farrar N R, et al. CO₂/Sn LPP EUV sources for device development and HVM[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 396-403.
- [72] Hu L, She L, Fang Y S, et al. Deformation characteristics of droplet generated by Rayleigh jet breakup[J]. AIP Advances, 2021, 11(4): 045310.
- [73] Cordero M L, Gallaire F, Baroud C N. Quantitative analysis of the dripping and jetting regimes in co-flowing capillary jets[J]. Physics of Fluids, 2011, 23(9): 094111.
- [74] Dong H M, Carr W W, Morris J F. An experimental study of drop-on-demand drop formation[J]. Physics of Fluids, 2006, 18(7): 072102.
- [75] Furbank R J, Morris J F. An experimental study of particle effects on drop formation[J]. Physics of Fluids, 2004, 16(5): 1777-1790.
- [76] Frohn A, Roth N. Dynamics of droplets[M]. Berlin: Springer, 2000: 63-83.
- [77] Vinokhodov A, Krivokorytov M, Sidelnikov Y, et al. Stable droplet generator for a high brightness laser produced plasma extreme ultraviolet source[J]. The Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10): 103304.
- [78] Hudgins D. Advanced irradiation schemes for target shaping in droplet-based laser-produced plasma light

- sources[D]. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 2019.
- [79] Pirati A, Peeters R, Smith D, et al. EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9776: 97760A.
- [80] Brandstätter M, Weber M M, Abhari R S. Non-axisymmetric droplet irradiation effects on ion and extreme ultraviolet light emission of laser-produced plasma light sources[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(23): 233306.
- [81] 吴文娟. 极紫外和软 X 射线窄带多层膜的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.
Wu W J. The study of extreme ultraviolet and soft X-ray narrowband multilayers[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [82] DuMond J, Youtz J P. An X-ray method of determining rates of diffusion in the solid state[J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(5): 357-365.
- [83] Spiller E. Low-loss reflection coatings using absorbing materials[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(9): 365-367.
- [84] Underwood J H, Barbee T W. Soft X-ray imaging with a normal incidence mirror[J]. *Nature*, 1981, 294(5840): 429-431.
- [85] Louis E, Yakshin A E, Tsarfati T, et al. Nanometer interface and materials control for multilayer EUV-optical applications[J]. *Progress in Surface Science*, 2011, 86(11/12): 255-294.
- [86] Stearns D G, Rosen R S, Vernon S P. High-performance multilayer mirrors for soft X-ray projection lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1547: 2-13.
- [87] Yan P Y, Spiller E, Mirkarimi P. Characterization of ruthenium thin films as capping layer for extreme ultraviolet lithography mask blanks[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 25(6): 1859-1866.
- [88] Stuik R, Louis E, Yakshin A E, et al. Peak and integrated reflectivity, wavelength and gamma optimization of Mo/Si, and Mo/Be multilayer, multielement optics for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1999, 17(6): 2998-3002.
- [89] Frank F C, van der Merwe J H. One-dimensional dislocations. I. static theory[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, 1949, 198(1053): 205-216.
- [90] Stranski I N, Krastanow L. Zur theorie der orientierten ausscheidung von ionenkristallen aufeinander[J]. *Monatshefte Für Chemie Und Verwandte Teile Anderer Wissenschaften*, 1937, 71(1): 351-364.
- [91] Ohering M. *Materials science of thin films: deposition and structure*[M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- [92] Schwoebel R L, Shipsey E J. Step motion on crystal surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(10): 3682-3686.
- [93] Louis E, Voorma H J, Koster N B, et al. Enhancement of reflectivity of multilayer mirrors for soft X-ray projection lithography by temperature optimization and ion bombardment[J]. *Microelectronic Engineering*, 1994, 23(1/2/3/4): 215-218.
- [94] Louis E, van Hattum E D, van der Westen S A, et al. High reflectance multilayers for EUVL HVM-projection optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7636: 76362T.
- [95] Yakshin A E, van de Kruijs R W E, Nedelcu I, et al. Enhanced reflectance of interface engineered Mo/Si multilayers produced by thermal particle deposition[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6517: 158-166.
- [96] Qiu Q Q, Li Q F, Su J J, et al. Influence of operating parameters on target erosion of rectangular planar DC magnetron[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1899-1906.
- [97] Yu B, Jin C S, Yao S, et al. Control of lateral thickness gradients of Mo - Si multilayer on curved substrates using genetic algorithm[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3958-3961.
- [98] 喻波. 极紫外多层膜膜厚梯度控制及抗热损伤研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
Yu B. Study on the thickness gradient control and anti-thermal damage for EUV multilayers[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [99] 王海建. 输出波长短于 15 nm 的激光等离子体光源研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
Wang H J. Research on laser-produced plasma source with output wavelength shorter than 15 nm[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [100] Sizyuk T, Hassanein A. Optimization of extreme ultraviolet photons emission and collection in mass-

- limited laser produced plasmas for lithography application[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(3): 033102.
- [101] 兰慧. Sn 和 SnO₂靶激光等离子体特性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
Lan H. Research on the characteristics of laser produced Sn and SnO₂ plasma[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [102] Sizyuk T. Consequences of high-frequency operation on EUV source efficiency[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(8): 083105.
- [103] Fomenkov I, Brandt D, Ershov A, et al. Light sources for high-volume manufacturing EUV lithography: technology, performance, and power scaling[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2017, 6(3/4): 173-186.
- [104] Mizoguchi H, Nakarai H, Abe T, et al. Challenge of high power LPP-EUV source with long collector mirror lifetime for semiconductor HVM[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11147: 1114705.
- [105] Rimbert N, Escobar S C, Meignen R, et al. Spheroidal droplet deformation, oscillation and breakup in uniform outer flow[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 904: A15.
- [106] Tomie T. Tin laser-produced plasma as the light source for extreme ultraviolet lithography high-volume manufacturing: history, ideal plasma, present status, and prospects[J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2012, 11(2): 021109.
- [107] Hassanein A, Sizyuk T. Laser produced plasma sources for nanolithography: recent integrated simulation and benchmarking[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(5): 053105.
- [108] Benoit N, Yulin S, Feigl T, et al. Radiation stability of EUV Mo/Si multilayer mirrors[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2005, 357(1/2): 222-226.
- [109] 徐向东, 周洪军, 洪义麟, 等. 同步辐射光学元件辐照污染及其清洁处理[J]. *真空科学与技术学报*, 2000, 20(2): 114-119.
Xu X D, Zhou H J, Hong Y L, et al. Cleaning of contaminated optics devices by synchrotron radiation[J]. *Vacuum science and technology*, 2000, 20(2): 114-119.
- [110] 宋源. 极紫外多层膜表面碳污染原子氢清洗技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
Song Y. Research on atomic hydrogen cleaning carbon contaminations on EUV multilayer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [111] Harilal S S, O' Shay B, Tao Y, et al. Ion debris mitigation from tin plasma using ambient gas, magnetic field and combined effects[J]. *Applied Physics B*, 2007, 86(3): 547-553.
- [112] Graham S, Steinhaus C A, Clift W M, et al. Atomic hydrogen cleaning of EUV multilayer optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5037: 460-469.
- [113] Bajt S, Chapman H N, Nguyen N, et al. Design and performance of capping layers for EUV multilayer mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5037: 236-248.
- [114] Yulin S, Benoit N, Feigl T, et al. Mo/Si multilayers with enhanced TiO₂- and RuO₂-capping layers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6921: 692118.
- [115] 窦银萍, 孙长凯, 林景全. 激光等离子体极紫外光刻光源[J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 20-33.
Dou Y P, Sun C K, Lin J Q. Laser-produced plasma light source for extreme ultraviolet lithography[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 20-33.
- [116] 冷雨欣, 王乘, 赵全忠, 等. 激光束引导的液滴靶控制系统: CN103217870A[P]. 2013-07-24.
Leng Y X, Wang S, Zhao Q Z, et al. Droplet target control system guided by laser beam: CN103217870A [P]. 2013-07-24.
- [117] Brandstätter M. Debris emission and mitigation of droplet-based laser-produced plasma sources[D]. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology in Zürich, 2020.
- [118] CWG 科威晶官网. 研发实力: 武汉光谷科威晶激光技术有限公司 [EB/OL]. [2022-01-18]. <http://cwgchina.com.cn/Research2.html>.
CWG. R & D strength: Wuhan Optical Valley keweiying Laser Technology Co., Ltd[EB/OL]. [2022-01-18]. <http://cwgchina.com.cn/Research2.html>.
- [119] 钮靖. 高功率横流 CO₂激光器光腔精密调节与控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Niu J. Precise adjustment and control of the resonator for high power transverse flow CO₂ laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [120] 潘其坤, 郭劲, 陈飞, 等. 一种激光功率稳定方法及激光功率放大系统: CN111628401B[P]. 2021-11-02.
Pan Q K, Guo J, Chen F, et al. Laser power stabilizing method and laser power amplifying system: CN111628401B[P]. 2021-11-02.
- [121] 潘其坤, 郭劲, 陈飞, 等. 双波长激光共轴输出系统

- 与方法: CN113659416A[P]. 2021-11-16.
- Pan Q K, Guo J, Chen F, et al. Dual-wavelength laser coaxial output system and method: CN113659416A[P]. 2021-11-16.
- [122] 李鑫鹏, 于德洋, 郭劲, 等. 极紫外光刻光源系统光束指向稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714004.
- Li X P, Yu D Y, Guo J, et al. Study on beam pointing stability of extreme ultraviolet lithography light source system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714004.
- [123] 孙海轶, 王成, 王关德, 等. 一种用于 EUV 光源的熔融液滴发生装置: CN213876314U[P]. 2021-08-03.
- Sun H Y, Wang C, Wang G D, et al. A Melting droplet generating device for EUV light source: CN213876314U[P]. 2021-08-03.
- [124] 孙海轶, 王成, 王关德, 等. 一种用于 EUV 光源中液滴靶的一体化锡原料罐装系统: CN112162466B[P]. 2021-09-07.
- Sun H Y, Wang C, Leng Y X, et al. An integrated tin filling system for Droplet target in EUV light source: CN112162466B[P]. 2021-09-07.
- [125] 尹培琪, 王新兵, 武耀星, 等. 脉冲 Nd:YAG 激光诱导水滴等离子体的实验研究[J]. 激光技术, 2020, 44(6): 726-731.
- Yin P Q, Wang X B, Wu Y X, et al. Experimental study on water droplet plasma induced by pulse Nd:YAG laser[J]. Laser Technology, 2020, 44(6): 726-731.
- [126] 孙秦, 田雷超, 武耀星, 等. 朗缪尔探针诊断脉冲激光锡等离子体特性[J]. 激光技术, 2021, 45(1): 109-114.
- Sun Q, Tian L C, Wu Y X, et al. Research on the characteristics of laser produced tin plasma by using Langmuir probe[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 109-114.
- [127] 齐乐华, 罗俊, 李莉, 等. 均匀液滴喷射过程仿真与试验研究[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 86-92.
- Qi L H, Luo J, Li L, et al. Simulation and experiment research of the uniform droplet spray process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 86-92.
- [128] 肖渊, 齐乐华, 曾祥辉, 等. 气压驱动金属微熔滴可控喷射及沉积精度分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 156-160.
- Xiao Y, Qi L H, Zeng X H, et al. Uniform metal droplet produced by pneumatic generator with controlled spray process and analysis of the droplet deposition accuracy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 156-160.
- [129] 王占山, 黄秋实, 张众, 等. 极紫外、X射线和中子薄膜光学元件与系统[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0131001.
- Wang Z S, Huang Q S, Zhang Z, et al. Extreme ultraviolet, X-ray and neutron thin film optical components and systems[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0131001.
- [130] 中国科学院上海光学精密机械研究所. 上海光机所 13.5 nm 软 X 射线反射镜获得 67.8% 的反射率(cas.cn) [EB/OL]. (2011-04-28) [2022-01-18]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/kydt/201105/t20110503_3126823.html.
- Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. The reflectivity of the 13.5 nm soft X-ray mirror of Shanghai Institute of Optics and mechanics was 67.8% [EB/OL]. (2011-04-28) [2022-01-18]. http://www.siom.cas.cn/xwzx/kydt/201105/t20110503_3126823.html.
- [131] 王珣, 金春水, 李春, 等. 极紫外反射镜氧化物保护层的制备与表征[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0331001.
- Wang X, Jin C S, Li C, et al. Preparation and characteristic of oxide capping-layer on extreme ultraviolet reflective mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0331001.
- [132] 孙诗壮, 金春水, 喻波, 等. Mo/Si 原子高能量沉积中反射和再溅射的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1102001.
- Sun S Z, Jin C S, Yu B, et al. Reflection and resputtering of Mo/Si atoms during high-energy deposition[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1102001.
- [133] 孙诗壮, 金春水, 喻波, 等. Mo/Si 多层膜表面粗糙度相关镀膜工艺的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1031002.
- Sun S Z, Jin C S, Yu B, et al. Research on surface roughness related coating processes of Mo/Si multilayers [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1031002.