

文章编号: 1001-3806(2010)06-0725-04

CO₂ 激光等离子体极紫外光源收集镜研究

朱新旺¹, 王新兵¹, 傅焰峰², 卢彦兆¹, 石玉华¹

(1. 华中科技大学 武汉光电国家实验室, 武汉 430074; 2. 武汉光讯科技股份有限公司, 武汉 430074)

摘要: 为了研究极紫外光源系统中收集镜的形状和液体微滴的漂移, 计算了收集镜的参量, 并采用 ZEMAX 模拟了液体微滴上下和左右漂移 50 μm , 100 μm , 150 μm 时中间焦点的成像变化情况。结果表明, 液体微滴在上下方向上的漂移对中间焦点成像的影响很大, 应该尽量将上下漂移控制在 20 μm 以下; 而液滴在光轴方向上的漂移对中间焦点成像的影响稍小。

关键词: 激光技术; X 射线光学; 极紫外光源; 激光等离子体; 收集镜; ZEMAX

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.002

Research of collector mirrors of CO₂ laser produced plasma EUV source

ZHU Xin-wang¹, WANG Xin-bing¹, FU Yan-feng², LU Yan-zhao¹, SHI Yu-hua¹

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science of Technology, Wuhan 430074, China; 2. Accelink Technologies Co. Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to study the shape of the extreme ultraviolet (EUV) collector mirror and liquid droplets drift of the EUV light source system, the parameters for the collector mirror were calculated. The images of the intermediate focus were simulated with ZEMAX when the liquid droplets drifted 50 μm , 100 μm , 150 μm from top to bottom and from left to right. The results show that the drift of the liquid micro-droplets in the upper and the lower direction have great influence on the imaging of the intermediate focus point, the drift should be controlled below 20 μm in this direction, and the drift of the liquid micro-droplets in the optical axis direction have smaller influence on the imaging of the intermediate focus point.

Key words: laser technique; X-ray optics; extreme ultraviolet source; laser produced plasma; collector mirror; ZEMAX

引言

光刻技术发展到现在, 所利用的光源波长已经从 436nm, 365nm 的近紫外转变到 248nm, 193nm 的深紫外波段, 同时利用浸没式技术, 增大数值孔径, 32nm 节点被成功突破。然而根据摩尔定律, 光刻的线宽必将不断缩小, 光刻所面临的挑战也将越来越大。极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 光刻作为传统光学光刻的延续, 目前被国际上广泛认为是下一代光刻技术中最有前途的方法, 它向人们提供了突破 22 节点的途径^[1]。IBM 联盟计划 2013 年 ~ 2014 年左右将 EUV 应用于 15nm 技术节点。但是, 限制 EUV 光刻技术发展的一个主要制约因素是大功率、高质量的 EUV 光源难以获得。根据预测, 如果将 EUV 技术应用于工业上的规模化生产, 需要 EUV 光刻系统输出的极紫外光功率达到

115W 以上。激光等离子体 (laser produced plasma, LPP) 光源由于其具备高功率输出的优势最有希望担负起 EUV 光刻技术量产的大任^[2-3], 进而继 193nm 浸没式光刻技术后成为集成电路制造领域的主流光刻技术。

近年来, 人们将驱动激光从 1.06 μm 的 Nd:YAG 激光转移到 10.6 μm 的 CO₂ 激光, 一下又突显出 LPP 的巨大优势, 特别是在工业量产上更具现实性。CO₂ 激光器的成本很低, 在市场上有可靠的、高功率连续输出的商用激光系统可以用作放大系统。不像固体 Nd:YAG 激光器, CO₂ 激光器的工作物质不会受到热传导方面的限制。它的工作气体能够被有效的冷却, 因此, 激光的光束质量非常好。另外, CO₂ 激光由于波长很长, 临界密度很低 (10¹⁹ cm⁻³), 相对 Nd:YAG 激光 (10²¹ cm⁻³) 而言要低两个数量级, 这样 10.6 μm CO₂ 激光产生的等离子体密度小于 10¹⁹ cm⁻³, 与放电产生等离子体 (discharge produced plasma, DPP) 密度接近, 因此, 对于 13.5nm 附近 EUV 辐射的自吸收很大程度上降低了, 这样, 便可以更有效地提高 EUV 的转换效

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目

作者简介: 朱新旺 (1984-), 男, 硕士研究生, 现主要研究极紫外光刻和光学系统的设计。

* 通讯联系人。E-mail: xbwang@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2010-01-14; 收到修改稿日期: 2010-02-02

率^[4-5]。CO₂激光等离子体 EUV 光源是目前的发展趋势。

作者研究了 CO₂ 激光等离子体 EUV 光源系统中收集镜的形状和液体微滴的漂移两个关键的因素。计算了能达到 115W 应用要求的光收集镜子的参量。并通过 ZEMAX 模拟了液体微滴上下和左右逐渐漂移 50μm, 100μm, 150μm 时中间焦点 (intermediate focus, IF) 的成像变化情况。

1 EUV 光源收集镜参量的计算

CO₂ 激光等离子体 EUV 光源系统包括 CO₂ 激光器、液体微滴生成器、收集光路和碎屑过滤消除装置等部分。收集光路中最重要的就是收集镜,其研究重点是增大收集角,提高反射效率和延长使用寿命。目前 LPP 光源的光收集镜已达到理论极限 5sr。

图 1 是 CO₂ 激光等离子体 EUV 光源系统。在此

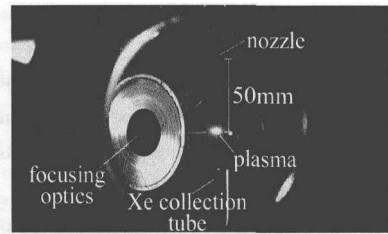


Fig. 1 CO₂ laser produced plasma EUV source

系统中,一个大型正入射椭圆多层反射镜将由等离子体发出的 EUV 射线聚焦至中间焦点处^[6]。高能 CO₂ 激光光束穿过收集镜的中央通孔轰击靶材,靶材是从高压、高频的喷嘴中喷出的液体微滴,由此产生高温等离子体。收集镜则以正入射方式将等离子体产生的反向 EUV 射线反射并汇聚到 IF。收集镜由 Mo/Si 多层膜构成,理论和实验证明,这种反射镜对于 13nm ~ 14nm 波长极紫外光具有 70% 的高反射率,被认为是 13.5nm 极紫外光刻的最终解决方案^[7]。

收集镜通常是椭球面的,也有球面或平面的。图 2 是 Cymer 公司提出的收集镜的示意图^[8]。收集镜口

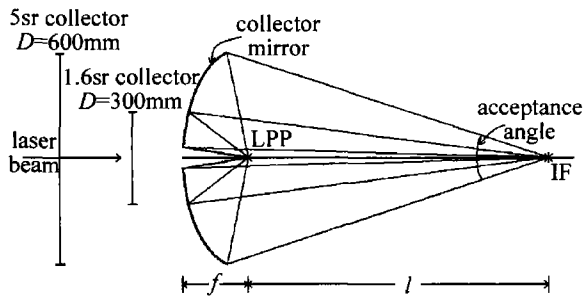


Fig. 2 Ellipsoidal collector mirror of EUV source

径 0.6m,有效的光收集立体角达到 5sr;子孔径 0.3m,有效的光收集立体角为 1.6sr。参考文献[8]中给出了光收集镜的示意图,但并未给出其具体参量,本文中

计算了光收集镜的各参量。

立体角的定义是:球面面积与半径平方的比值,

即: $\Omega = A/r^2$ (1)

如图 3 所示,根据(1)式,得到:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta \sin\theta' d\theta' d\phi = 2\pi \int_0^\theta \sin\theta' d\theta' = 2\pi(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

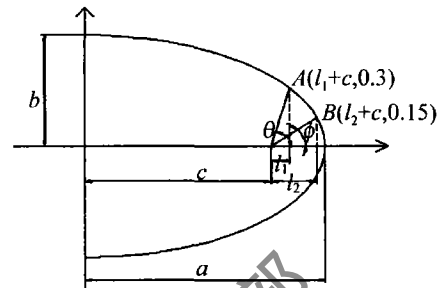


Fig. 3 Schematic diagram of rotating ellipsoidal mirror

由 $\Omega_1 = 5, \Omega_2 = 1.6$ 可计算得 A 点坐标为 ($l_1 + c,$

0.3), B 点坐标为 ($l_2 + c, 0.15$), 代入椭球方程 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, 有:

$$\frac{(c + 0.062586)^2}{a^2} + \frac{0.3^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{(c + 0.167703)^2}{a^2} + \frac{0.15^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

由此可计算出椭球收集镜的参量为: $a = 0.888615, b = 0.561625, c = 0.688632$ 。

图 4 为应用 ZEMAX 光学设计软件模拟的椭球光

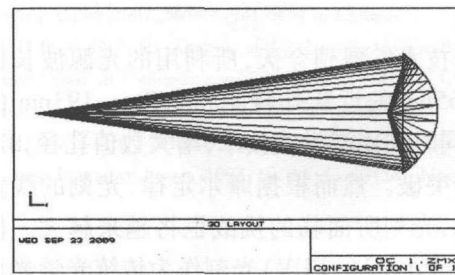


Fig. 4 Simulated ellipsoid light collection mirror with ZEMAX

收集镜,它有效的光收集立体角为 5sr,口径为 0.6m,极紫外光源位于右边焦点处,离镜子顶点的距离为 0.199983m。左边焦点即是 IF,离镜子距离 1.577248m。

2 液滴漂移对成像的影响

CO₂ 激光等离子体 EUV 光源是采用高能 CO₂ 激光与液体微滴相互作用得到极紫外光。因此,液滴的漂移对转换效率影响很大。液滴长期的稳定是保证 EUV 光源 IF 光源稳定性的关键因素。对于液体微滴生成器的要求是能够以可控的频率安全、均匀、稳定地生成锡液体微滴,并且系统可以长时间工作,满足大规

模生产的要求。据目前报道的液体微粒生成器可以在500kHz 的频率下产生直径为 20μm, 速率为 20m/s 的锡液体微滴^[9]。

由于流体动力波动, 液体微滴的运动通常不稳定。根据参考文献[9]中报道的液滴的时间和空间的稳定性, 本文中运用 ZEMAX 模拟了锡液体微滴被激发后等离子体光源成像质量的好坏。在模拟计算中, 光源半径为 100μm。

收集镜的成像质量可由点列图判断。点列图是指由一点发出的许多光线经光学系统后, 因像差使其与像面的交点不再集中于同一点, 而形成了一个散布在一定范围的弥散图形。点列图是在现代光学设计中最常用的评价方法之一。

图5 为光源往下漂移 50μm 时 ZEMAX 得出的 IF

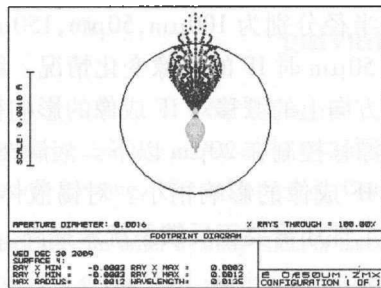


Fig.5 The light footprint diagram with the droplets drifting down 50μm 的光线足迹图。图6 为光源往下漂移 50μm 时 ZEMAX 得出的点列图, 采用均方根半径来表示, 先求每条

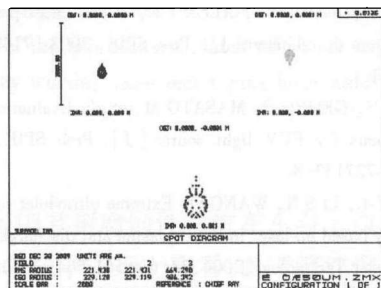


Fig.6 The spot diagram with the droplets drifting down 50μm 光线和参考点之间的距离的平方, 再求出所有光线的平均值, 然后取平方根。点列图的均方根半径取决于每一根光线, 因而它会给出光线光斑的粗略概念。根据图5 和图6, 可计算出成像的大小和位置。

如图7 所示, 光源位于椭球收集镜的第1 个焦点

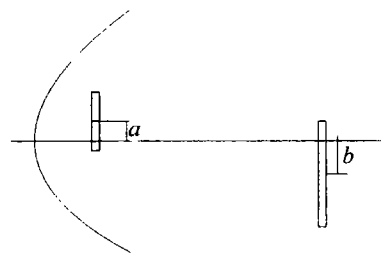


Fig.7 Schematic diagram of droplet moving up and down 处, 成像于椭球收集镜的第2 个焦点。根据日本极紫

外光刻系统开发协会最近的报道^[9], 作者模拟了光源在第1 焦点处上下和左右各漂移 50μm 的成像情况。

如图7 所示, a 为光源中心点离光轴的距离, b 为 IF 像中心离光源的距离。作者模拟了 a 从 50μm 变化到 -50μm 时光源的成像情况。

由 ZEMAX 计算得到的结果如图8 所示, 当锡液

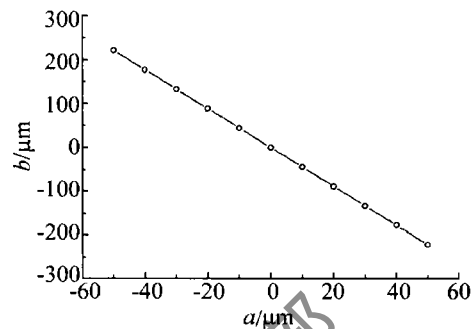


Fig.8 The spot changes in IF when the liquid droplets drifting up and down (100μm)

体微滴在上下方向上由 50μm 逐渐漂移至 -50μm 时, IF 处光斑大小不变, 半径恒为 442.86μm, 光斑中心由 -221μm 漂移到 221μm, 从图中也可看出, 光收集镜放大倍率为 4.4。

如图9 所示, m 为光源中心点在轴向漂移的距离。

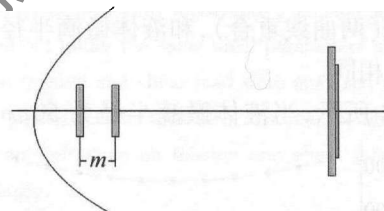


Fig.9 Schematic diagram of droplet moving left and right 作者模拟了 m 从 50μm 变化到 -50μm 时光源的成像情况。

由 ZEMAX 计算得如图10 所示, 当液体微滴在光

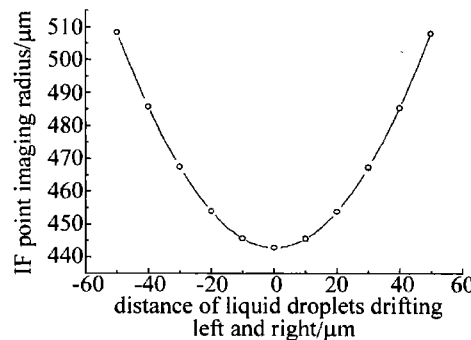


Fig.10 The spot changes in IF when the liquid droplets drifting left and right(100μm)

轴上左右方向由 50μm 漂移至 -50μm 时, IF 光斑中心位置不变, 光斑大小由 507.912μm 变化到 442.86μm 后, 又逐渐变化到 508.269μm。

可以看出, 液滴在上下方向上的漂移对 IF 成像的影响很大, 在光轴方向上的漂移对 IF 成像的影响稍小。

3 液滴大小对成像的影响

在上面的模拟计算中,作者将液滴的半径定为 $100\mu\text{m}$ 。但由于液体微滴生成器产生的液滴大小有一定的波动,其半径大小是变化的。下面模拟计算了液滴半径为 $50\mu\text{m}$ 和 $150\mu\text{m}$ 的情况。

计算可得,当液体微滴半径为 $50\mu\text{m}$,在上下方向上由 $50\mu\text{m}$ 逐渐漂移至 $-50\mu\text{m}$ 时,IF光斑大小不变,半径恒为 $221.43\mu\text{m}$ 。当液体微滴半径为 $150\mu\text{m}$,IF光斑半径恒为 $664.29\mu\text{m}$,如图11所示,当液体微滴

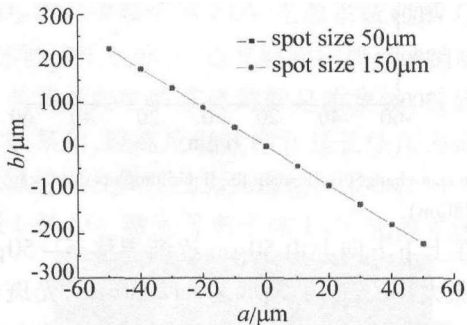


Fig. 11 The spot changes in IF when the liquid droplets drifting up and down

半径为 $50\mu\text{m}$ 和 $150\mu\text{m}$ 时,光斑中心都由 $-221\mu\text{m}$ 漂移到 $221\mu\text{m}$ (两曲线重合),和液体微滴半径为 $100\mu\text{m}$ 时漂移情况相同。

如图12所示,当液体微滴半径为 $50\mu\text{m}$ 时,液体

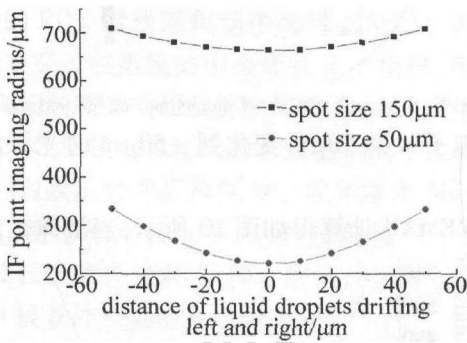


Fig. 12 The spot changes in IF when the liquid droplets drifting left and right

微滴在光轴上左右方向由 $50\mu\text{m}$ 漂移至 $-50\mu\text{m}$,IF光斑中心位置不变,光斑大小由 $332.778\mu\text{m}$ 变化到 $221.430\mu\text{m}$ 后,又逐渐变化到 $333.740\mu\text{m}$ 。而当液体微滴半径为 $150\mu\text{m}$ 时,液体微滴在光轴上左右方向由 $50\mu\text{m}$ 漂移至 $-50\mu\text{m}$,IF光斑中心位置不变,光斑大小由 $708.970\mu\text{m}$ 变化到 $664.290\mu\text{m}$ 后,又逐渐变化到 $709.918\mu\text{m}$ 。

可以看出,当液体微滴半径分别为 $100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ 时,IF的光斑半径分别为 $442.86\mu\text{m}$, $221.43\mu\text{m}$, $664.29\mu\text{m}$ 。当液体微滴在上下方向上由

$50\mu\text{m}$ 逐渐漂移至 $-50\mu\text{m}$ 时,3种情况下IF光斑中心漂移情况相同,光斑中心都是由 $-221\mu\text{m}$ 漂移到 $221\mu\text{m}$ 。当液体微滴在光轴上方向由 $50\mu\text{m}$ 左右漂移至 $-50\mu\text{m}$ 时,IF光斑大小分别由 $507.912\mu\text{m}$ 变化到 $442.86\mu\text{m}$ 后,又逐渐变化到 $508.269\mu\text{m}$; $332.778\mu\text{m}$ 变化到 $221.430\mu\text{m}$ 后,又逐渐变化到 $333.740\mu\text{m}$; $708.970\mu\text{m}$ 变化到 $664.290\mu\text{m}$ 后,又逐渐变化到 $709.918\mu\text{m}$ 。

4 结 论

锡液滴微滴的长期稳定是保证 EUV IF 光源稳定的关键。研究了 EUV 光源系统中收集镜的形状和液体微滴的漂移,对激光等离子体 EUV 光源发展进行了介绍,计算出了收集镜的参量。并通过 ZEMAX 模拟了液体微滴半径分别为 $100\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ 时上下和左右漂移 $50\mu\text{m}$ 时IF的成像变化情况。结果表明,液滴在上下方向上的漂移对IF成像的影响很大,应该尽量将上下漂移控制在 $20\mu\text{m}$ 以下。液滴在光轴方向上的漂移对IF成像的影响稍小。对锡液体微滴的时间和空间稳定性还需要正反馈系统来提高。

参 考 文 献

- [1] 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] DAVID C B, IGOR V F, ALEX I E, et al. Laser produced plasma source system development[J]. Proc SPIE, 2008, 7140: 71401E/1-71401E/11.
- [3] TAKSSHI S, GEORG S, MASATO M, et al. Evaluation at the intermediate focus for EUV light source [J]. Proc SPIE, 2009, 7271: 727133/1-727133/8.
- [4] CHENG Y L, LI S N, WANG Q. Extreme ultraviolet source of micro-lithography based on laser induced plasma and discharge induced plasma[J]. Laser Technology, 2004, 28(6):561-564 (in Chinese).
- [5] LIU P, WANG Q, LI S N. Progress of X-ray laser in capillary discharge. [J]. Laser Technology, 2001, 25(3): 178-182 (in Chinese).
- [6] BJORN A M H, LARS R, MAGNUS B, et al. Status of the liquid-xenon-jet laser-plasma source for EUV lithography[J]. Proc SPIE, 2002, 4688: 102-109.
- [7] MASAYUKI S, NORIAKI K, KATSUHIKO M, et al. Low-stress and high-reflective molybdenum/silicon multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography[J]. Proc SPIE, 2004, 5374:104-111.
- [8] NORBERT R, ALEX I E, WILLIAM F M, et al. EUV source collector [J]. Proc SPIE, 2006, 6151:61513R/1-61513R/9.
- [9] AKIRA E, HIROSHI K, YOSHIFUMI U, et al. Laser produced plasma source development for EUV lithography[J]. Proc SPIE, 2009, 7271:727108/1-727108/7.