

# 极紫外辐照损伤测试系统光学仿真研究

陈进新<sup>1,2</sup> 吴晓斌<sup>1</sup> 王宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电研究院, 北京 100094

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了科学地筛选极紫外光刻机所用的材料和工艺,需要建立极紫外辐照损伤测试系统、开展真空极紫外辐照下各种材料的损伤实验。极紫外辐照损伤测试系统主要包括极紫外光源、收集镜腔室和样品腔室。对极紫外辐照损伤测试系统进行了光学仿真,得到了像面在焦点处、像面离焦、收集镜平移、收集镜旋转等情况下的仿真结果。仿真结果表明:该极紫外辐照损伤测试系统焦深约为 $\pm 3$  mm;当像面上光斑半峰全宽基本不变时收集镜允许最大平移距离为 $\pm 1.2$  mm、允许最大转动转角为 $\pm 0.08^\circ$ ;当收集镜小角度旋转时,像面上光斑沿单一方向平移,且平移距离和旋转角度成比例关系。该仿真研究对搭建极紫外辐照损伤测试系统、进行极紫外辐照损伤测试具有重要指导意义。

**关键词** 光学制造;极紫外辐照损伤测试系统;光学仿真;椭球收集镜;像面

中图分类号 TN23; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.062201

## Optical Simulation Research on Damage Testing System of Extreme Ultraviolet Radiation

Chen Jinxin<sup>1,2</sup> Wu Xiaobin<sup>1</sup> Wang Yu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Damage testing system of extreme ultraviolet radiation, which is set to filter reasonably the materials and manufacturing processes for extreme ultraviolet lithography, consists of extreme ultraviolet source, collector chamber and sample chamber. Simulations of the damage testing system is provided when image plane is at focus and out of focus, and when the ellipsoidal collector is moving and rotating. The simulation results show that depth of focus in this system is  $\pm 3$  mm. When there is no typical change of average image size in image plane, the maximum moving distance of collector is  $\pm 1.2$  mm and the maximum rotation angle is  $\pm 0.08^\circ$ . When the collector rotates by a small angle, the image moves along a certain orientation and image moving distance is directly proportional to collector rotation angle. The results are instructive to build the damage testing system of extreme ultraviolet radiation and implement the testing.

**Key words** optical fabrication; damage testing system of extreme ultraviolet radiation; optical simulation; ellipsoidal collector; image plane

**OCIS codes** 220.4610; 350.4600; 340.7480; 000.2170

## 1 引言

光刻机是极大规模集成电路制造装备及成套工艺中必不可少的关键设备,极紫外(EUV)光刻技术是继193 nm 浸没式光刻技术之后的新一代光刻机技术<sup>[1-2]</sup>。由于空气及所有的折射光学材料对13.5 nm的EUV辐照具有强烈的吸收作用,导致EUV光刻机需要采用反射式光学系统并置于真空环境中。目前国内对EUV反射光学系统的研究取得了一定进展<sup>[3-7]</sup>。

EUV辐照会改变某些材料表面辐射散热性能,产生累积性特征的材料损伤,导致EUV光刻系统整体的

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-01-15; 网络出版日期: 2015-05-28

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001)

作者简介: 陈进新(1982—),男,博士研究生,主要从事极紫外系统设计等方面的研究。E-mail: ashion@aoe.ac.cn

导师简介: 王宇(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事准分子激光器等方面的研究。

E-mail: wangyu@aoe.ac.cn

性能发生不同程度的变化。为了指导 EUV 光刻机整机及分系统设计过程中的材料及工艺选择,确保达到 EUV 光刻机的可靠性和使用寿命要求,为 EUV 光刻系统材料的筛选提供科学依据,需要建立 EUV 辐照损伤测试系统、开展真空 EUV 辐照下各种材料的损伤实验。

## 2 极紫外辐照损伤测试系统

该 EUV 辐照损伤测试系统主要研究在模拟 EUV 光刻机环境的 EUV 辐照和真空条件下,不同材料的损伤情况。它主要包括 EUV 光源、收集镜腔室、样品腔室和各部分间的连接阀门,如图 1 所示。EUV 光源等离子体处产生 EUV 辐照,经过收集镜腔室中的 EUV 收集镜,聚焦到样品腔室中的样品上。在 EUV 光源相同输出的条件下,通过样品在主光轴上位置的移动来调节样品平面上辐照光斑的大小,从而对应不同的 EUV 辐照能量密度;或者在样品平面的相同位置,即相同光斑大小的条件下,通过调节 EUV 光源的不同输出能量来得到不同的 EUV 辐照能量密度。在开展辐照损伤测试前先观测材料样品的表面情况;进行不同的辐照能量密度和辐照时间测试,观测辐照后材料表面微结构的变化;经过对比可以得到不同样品的 EUV 辐照损伤情况。

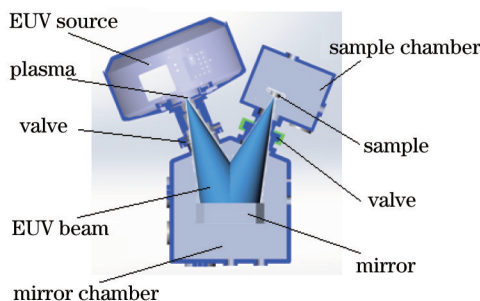


图 1 EUV 辐照损伤测试系统图

Fig.1 Damage testing system for materials of EUV radiation

拟采用德国 Fraunhofer ILT 研制的 EUV 光源,其主要参数:波长为 13.5 nm;半球范围内( $2\pi\text{sr}$ )的能量为 20 W;脉宽为 50 ns;重复频率为 1500 Hz;等离子体直径,即半峰全宽(FWHM)为 0.5 mm;等离子体长度为 6 mm。拟采用德国 optiX fab 生产的 EUV 收集镜,其主要参数:椭球反射面型;直径为 300 mm;放大倍率为 1:1;主光轴上物距为 600 mm;入射角为  $22^\circ$ 。系统光路图如图 2 所示,EUV 光源等离子体处和样品室中样品辐照点处为椭球面的两个焦点。椭球的长半轴为 600 mm,短半轴为  $600\text{ mm} \times \cos 22^\circ = 558.3\text{ mm}$ ,半焦距为  $600\text{ mm} \times \sin 22^\circ = 224.8\text{ mm}$ ,椭球面的正截面椭圆方程为  $\frac{x^2}{360000} + \frac{y^2}{309469.7} = 1$  ( $x, y$  单位为 mm);由图 2 可知,收集镜的收集全角为  $26.3^\circ$ ,对应的立体角为 0.16 sr。

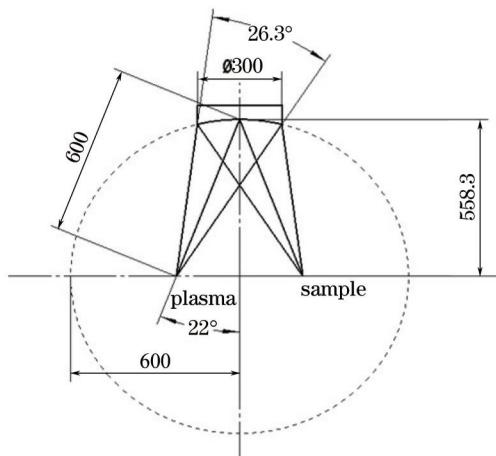


图 2 EUV 辐照损伤测试系统光路图

Fig.2 Optical path of damage testing system by EUV radiation

## 3 光学仿真结果及分析

采用 Zemax 软件对 EUV 辐照损伤测试系统进行仿真,仿真模型如图 3 所示。在等离子体(直径为

0.5 mm、长度为6 mm)外周增加一锥状物,确保光线朝收集镜方向发射并保证发射全角为 $26.3^\circ$ ;取像面恒垂直于主光轴。

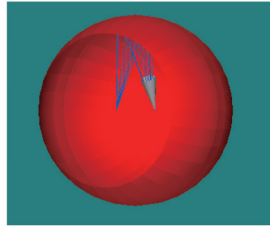


图3 光学仿真模型

Fig.3 Optical model for simulation

### 3.1 像面在焦点处

当像面在焦点处时,像面上光斑、过圆心横截面上光斑功率分布( $x$ 轴)、过圆心纵截面上光斑功率分布( $y$ 轴)如图4所示。由图4可知, $x$ 轴光斑半峰全宽为0.497 mm, $y$ 轴光斑半峰全宽为0.508 mm。

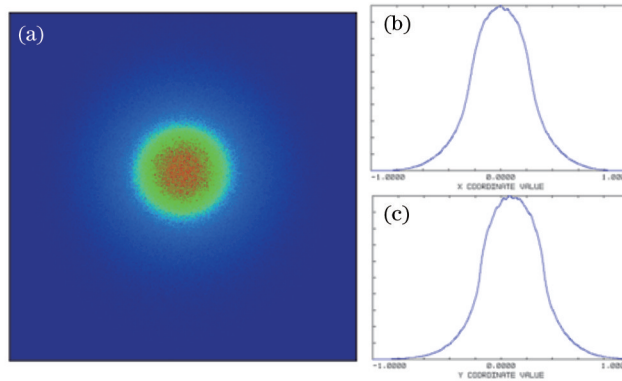


图4 像面在焦点处仿真结果。(a) 像面上光斑;(b) 过圆心横截面上光斑功率分布( $x$ 轴);  
(c) 过圆心纵截面上光斑功率分布( $y$ 轴)

Fig.4 Simulation results when image plane is at focus. (a) Spot of image plane; (b) spot power distribution of cross-section through the center ( $x$ -axis); (c) spot power distribution of vertical section through the center ( $y$ -axis)

### 3.2 像面离焦

以焦点为初始位置,以1 mm为步长在 $\pm 7$  mm范围内使像面沿主光轴方向移动,保持其余模型参数不变,可以得到 $x$ 轴半峰全宽、 $y$ 轴半峰全宽的一系列仿真结果。定义靠近收集镜方向为正、平均半峰全宽为横截面光斑半峰全宽和纵截面光斑半峰全宽的均值,仿真结果如表1所示;平均半峰全宽与离焦距离的关系如图5所示。由图5可知,焦深约为 $\pm 3$  mm,即离焦距离为 $\pm 3$  mm时光斑半峰全宽约为0.5 mm。

表1 像面离焦仿真结果

Table 1 Simulation results when image plane is out of focus

Defocusing distance /mm	Image size at $x$ -axis	Image size at $y$ -axis	Average image size
	(FWHM) /mm	(FWHM) /mm	(FWHM) /mm
-7	2.418	2.124	2.271
-6	2.056	1.740	1.898
-5	1.446	1.017	1.2315
-4	0.836	0.757	0.7965
-3	0.565	0.576	0.5705
-2	0.508	0.518	0.513
-1	0.497	0.511	0.504
0	0.497	0.508	0.5025
1	0.493	0.508	0.5005
2	0.502	0.515	0.5085
3	0.565	0.588	0.5765
4	0.859	0.859	0.859
5	1.356	1.288	1.322
6	1.853	1.627	1.74
7	2.260	2.102	2.181

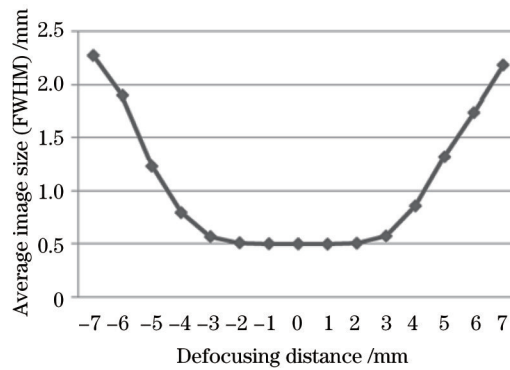


图5 平均半峰全宽与离焦距离的关系

Fig.5 Relationship between average image size (FWHM) and defocusing distance

### 3.3 收集镜平移

沿主光路法线方向移动收集镜位置(在 $\pm 3$  mm 范围内),保持其余模型参数不变,同样可以得到 $x$ 轴半峰全宽、 $y$ 轴半峰全宽的一系列仿真结果。定义靠近光源方向的平移为正,仿真结果如表2所示;半峰全宽与收集镜平移距离的关系如图6所示。由图6可知,当收集镜沿光路法线方向平移时,横截面光斑半峰全宽和纵截面光斑半峰全宽变化不一致;当收集镜移动距离为 $\pm 1.8$  mm时纵截面光斑半峰全宽变化4%,可近似认为没有变化;当收集镜移动距离为 $\pm 1.2$  mm时横截面光斑半峰全宽变化6%,可近似认为没有变化;综合横截面和纵截面,当光斑半峰全宽基本不变时收集镜允许移动距离为 $\pm 1.2$  mm。

表2 收集镜平移仿真结果

Table 2 Simulation results when EUV mirror is moving

Moving distance /mm	Image size at $x$ -axis (FWHM) /mm	Image size at $y$ -axis (FWHM) /mm
-3	2.056	1.379
-2	0.949	0.565
-1.8	0.768	0.520
-1.6	0.655	0.497
-1.4	0.588	0.508
-1.2	0.531	0.497
-1	0.508	0.497
0	0.497	0.508
1	0.497	0.508
1.2	0.531	0.497
1.4	0.565	0.497
1.6	0.667	0.486
1.8	0.836	0.520
2	1.017	0.565
3	2.034	1.333

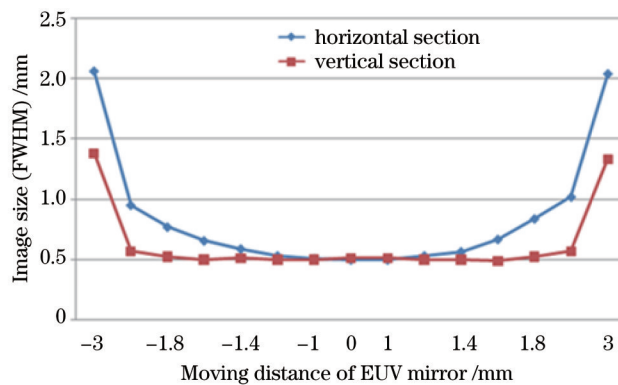


图6 半峰全宽与收集镜平移距离的关系

Fig.6 Relationship between image size (FWHM) and moving distance of EUV mirror

### 3.4 收集镜旋转

以收集镜中心为原点,以 $0.02^\circ$ 为步长在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内调整收集镜的俯仰(如图2所示,绕椭圆长轴的平行

轴,由垂直纸面朝外转向椭圆短轴方向为正)和偏转(如图2所示,绕垂直纸面方向,由椭圆短轴转向等离子体方向为正)转角,保持其余模型参数不变,可以得到一系列仿真结果。由像面上光斑的仿真图像可知,当收集镜旋转时,像面上光斑沿单一方向平移。俯仰仿真结果如表3所示;偏转仿真结果如表4所示;平均半峰全宽、光斑位移与收集镜旋转角度的关系分别如图7、图8所示。由图7、图8可知,当俯仰/偏转转角在 $\pm 0.08^\circ$ 范围内时,光斑半峰全宽都在0.5 mm左右,可近似认为不变(误差在10%以内);当调节收集镜俯仰时,像面上光斑仅发生横向位移,且横向位移和俯仰角度近似比例变化,即 $1^\circ$ 俯仰角对应光斑横向位移2.24 mm;当调节收集镜偏转时,像面上光斑仅发生纵向位移,且纵向位移和偏转角度近似比例变化,即 $1^\circ$ 偏转角对应光斑纵向位移2.35 mm。

表3 收集镜俯仰仿真结果

Table 3 Simulation results when EUV mirror is pitching

Pitch angle /( $^\circ$ )	Image size (FWHM) /mm	Horizontal displacement /mm
-0.08	0.544	-1.80
-0.06	0.536	-1.35
-0.04	0.528	-0.88
-0.02	0.528	-0.45
0	0.50	0
0.02	0.528	0.46
0.04	0.536	0.93
0.06	0.536	1.33
0.08	0.512	1.78

表4 收集镜偏转仿真结果

Table 4 Simulation results when EUV mirror is deflecting

Deflection angle /( $^\circ$ )	Image size (FWHM) /mm	Vertical displacement /mm
-0.08	0.496	1.88
-0.06	0.504	1.44
-0.04	0.514	0.96
-0.02	0.516	0.49
0	0.50	0
0.02	0.520	-0.51
0.04	0.508	-0.97
0.06	0.516	-1.45
0.08	0.496	-1.88

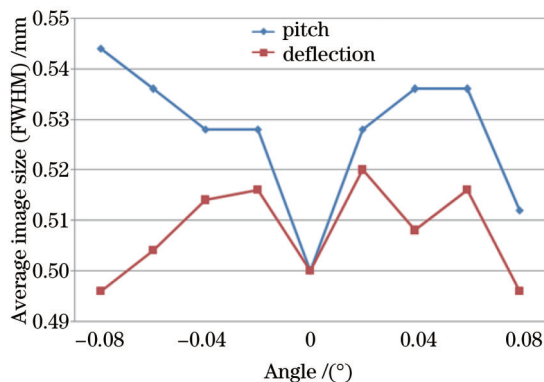


图7 平均半峰全宽与收集镜旋转角度的关系

Fig.7 Relationship between average image size (FWHM) and rotation angle of EUV mirror

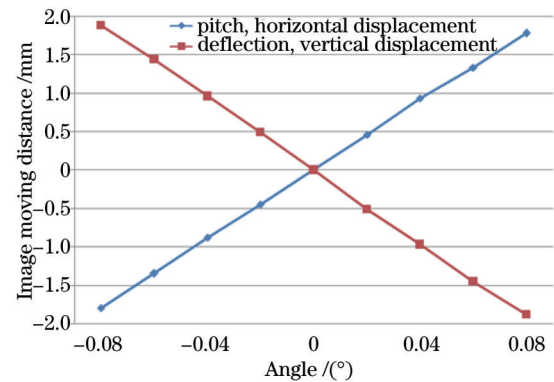


图8 光斑位移与收集镜旋转角度的关系

Fig.8 Relationship between image moving distance and rotation angle of EUV mirror

## 4 结 论

EUV辐照损伤测试系统主要包括EUV光源、收集镜腔室和样品腔室。对EUV辐照损伤测试系统进行了光学仿真,得到了像面在焦点处、像面离焦、收集镜平移、收集镜旋转等情况下的仿真结果,对搭建EUV辐照损伤测试系统、进行EUV辐照损伤测试具有重要指导意义。仿真结果表明:该EUV辐照损伤测试系统焦深约为 $\pm 3$  mm,对应光斑半峰全宽约为0.5 mm;当像面上光斑半峰全宽基本不变时收集镜允许最大平移距离为 $\pm 1.2$  mm、允许最大转动转角为 $\pm 0.08^\circ$ ;当收集镜小角度旋转时,像面上光斑沿单一方向平移,且平移距离和旋转角度成比例关系,即收集镜 $1^\circ$ 俯仰角对应像面上光斑横向位移2.24 mm,收集镜 $1^\circ$ 偏转角对应像面上光斑纵向位移2.35 mm。

### 参 考 文 献

- 1 H Meiling, W de Boeij, F Bornebroek, *et al.*. From performance validation to volume introduction of ASML's NXE platform[C]. SPIE, 2012, 8322: 83221G.
- 2 M Lowisch, P Kuerz, O Conradi, *et al.*. Optics for ASML's NXE: 3300B platform[C]. SPIE, 2013, 8679: 86791H.
- 3 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16~22 nm extreme ultraviolet lithographic Objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0922005.  
曹 振, 李艳秋, 刘 菲. 16~22 nm极紫外光刻物镜工程化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922005.
- 4 Wang Xun, Jin Chunshui, Kuang Shangqi, *et al.*. Simulation model of surface carbon deposition contamination under extreme ultraviolet radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0531001.  
王 珣, 金春水, 匡尚奇, 等. 极紫外光辐照下表面碳沉积污染的计算模型[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0531001.
- 5 Zuo Baojun, Zhu Dongyuan, Zhang Shuqing, *et al.*. Development of EUV source collectors for next generation lithography[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(11): 1163-1167.  
左保军, 祝东远, 张树青, 等. 下一代光刻技术的EUV光源收集系统的发展[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1163-1167.
- 6 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Foundation and application of model for multilayers analysis in extreme ultra-violet lithography projection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0811002.  
王 君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻投影物镜中多层膜分析模型的建立及应用[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811002.
- 7 Liu Xiaolei, Li Sikun, Wang Xiangzhao. Simplified model for defective multilayer diffraction spectrum simulation in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0905002.  
刘晓雷, 李思坤, 王向朝. 极紫外光刻含缺陷多层膜衍射谱仿真简化模型[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0905002.

栏目编辑: 张 雁