

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0257-06

极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术

刘 克 李艳秋

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要 投影物镜波像差在线检测技术是极紫外光刻(EUVL)实现 32 nm 及其以下技术节点的关键技术,对于光刻机的整机集成具有重要研究意义和实用价值。介绍了目前国际上极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术的最新研究进展以及几种主流检测技术的原理和特点,并对其检测精度、检测速度以及动态测量范围等技术指标进行了比较分析;分析了开发投影物镜波像差在线检测设备所应解决的若干关键技术;最后,对极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术的发展进行了总结和展望。

关键词 光学测量;极紫外光刻;投影物镜;波像差检测

中图分类号 O436.1;TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0257

At-Wavelength Interferometry of Projection Optics for Extreme Ultraviolet Lithography

Liu Ke Li Yanqiu

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The at-wavelength interferometry of projection optics, which has important research significance and practical value in integration of lithography tool, is one of the core enabling techniques for extreme ultraviolet lithography (EUVL) facing 32 nm technology node and beyond. In this paper, recent developments of at-wavelength interferometry of EUVL optics are reviewed. Several key interferometry techniques are presented in details. The important parameters of the key techniques, such as, measurement accuracy, speed and dynamic range etc. are analyzed and compared. The core techniques in developing at-wavelength intereferometry device are analyzed. Finally, a summary is given and some prospects for at-wavelength interferometry of EUVL optics are proposed.

Key words optical measurement; extreme ultraviolet lithography; projection optics; wavefront metrology

1 引 言

2007 年国际半导体技术路线图(ITRS 2007)指出,极紫外光刻技术(extreme ultraviolet lithography, EUVL)是实现 32 nm 及其以下技术节点最有潜力的候选技术之一。EUVL 投影物镜采用波长 13.4 nm 的曝光光源,任何材料在该波段的折射率均接近于 1,而且吸收较大,需要采用真空环境和反射式光学设计^[1],在镜头加工过程中需要在基底表面镀有梯度多层膜,即使不考虑膜层厚度误差以及膜层材料折射率误差,也会不可避免地导致色差^[2]。所以,工作在短波段的 EUVL 投影物镜的波像差由设计残差、反射

镜基底的面形加工精度、多层膜的特性和集成装调共同决定,必须利用工作波长进行在线检测^[3]。

产业化 EUVL 设备的投影物镜通常为 4 或 6 个镀有多层膜的非球面反射镜系统,为了满足 32 nm 以下技术节点的曝光要求,投影物镜系统的波像差要求控制在均方根(RMS)0.03 λ 之内,相当于 0.45 nm^[4]。美国 Lawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)完成了数值孔径 0.3 的 MET 投影物镜工作波段装调,装调后波像差为 RMS 0.04 λ ,约为 0.55 nm^[5~8]。日本 Nikon 完成了面向 45 nm 动态随机存储器(DRAMs)以及 32 nm 微处

基金项目: 国家自然科学基金(10674134),国家科技重大专项(2008ZX02501-009),教育部长江学者奖励计划和北京理工大学基础研究基金(20070142008)资助课题。

作者简介: 刘 克(1980—),男,讲师,博士,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: liuke@bit.edu.cn

理器的产业化 EUVL 设备 EUV1^[9],其投影物镜由 6 面非球面反射镜组成,全视场波像差的平均值达到了 RMS0.6 nm。

EUVL 投影物镜极为苛刻的波像差容限对光学设计、加工和集成装调提出了空前的要求。高精度、工作波长的波像差检测设备研制成为开发高分辨 EUVL 投影物镜的关键问题,设备的波像差检测精度要高达前所未有的 RMS 0.1 nm^[4]。美国、日本等国家在 20 世纪 90 年代就开展了专用检测设备的研发,本文介绍国际相关机构在该领域的最新进展,探讨开发 EUVL 投影物镜波像差在线检测专用设备的若干关键技术,并对研究的发展方向进行展望。

2 EUVL 投影物镜波像差在线检测技术研究现状

美国 LBNL 早在 1993 年就开展了 EUVL 投影物镜波像差在线检测专用设备的研究,开发出了集成相移点衍射干涉仪 (phase-shifting point diffraction interferometer, PS/PDI) 和交叉光栅横向剪切干涉仪 (cross grating lateral shearing interferometer, CGLSI) 的检测设备,检测精度达到了 RMS 0.05~0.1 nm^[10]。到目前为止,LBNL 利用该设备已经完成了 Schwarzschild,ETS 和 MET 3 种共 9 套 EUV 投影物镜的在线检测和装调,数值孔径在 0.08~0.3 之间,装调后投影物镜波像差分别达到了 RMS 0.6 nm (Schwarzschild)^[11],RMS 0.69 nm (ETS)^[12,13] 和 RMS 0.55 nm (MET)^[5~8]。

日本在该领域的研究起源于 association of super-advanced electronics technology (ASET) 1999 年开发的 PS/PDI 原理样机 interferometric test stand (ITS)^[14],利用波长 632.8 nm 的可见光检测

数值孔径 0.1 的 Schwarzschild 物镜,ITS 的重复检测精度达到了 RMS 0.0018 λ 。2002 年日本 extreme ultraviolet lithography system development association (EUVA) 接手 ASET 的工作,开展极紫外波段在线检测设备的研发。EUVA 开发的原理样机 experimental EUV interferometer (EEI)^[15,16] 集成了 PS/PDI, CGLSI, 狭缝衍射干涉仪 (line diffraction dnterferometer, LDI), 相移横向剪切干涉仪 (phase-shifting lateral shearing interferometer, PLSI), 狭缝横向剪切干涉仪 (slit lateral shearing interferometer, SLSI), 双光栅横向剪切干涉仪 (double-grating lateral shearing interferometer, DLSI) 和数字泰伯干涉仪 (digital Talbot interferometer, DTI)。EEI 对数值孔径 0.2 的 Schwarzschild 待测物镜的检测实验结果表明^[17,18], PS/PDI 检测精度最高,达到了 RMS 0.078 nm;以 PS/PDI 作为基准标定其他检测方法,LDI 的检测精度为 RMS 0.24 nm;CGLSI 的检测精度为 RMS 0.15 nm。在 EEI 对比各种检测方法的基础上,EUVA 开发了用于 EUVL 量产的 6 镜投影物镜 (数值孔径 0.25) 的波像差在线检测和装调专用设备 EUV wavefront metrology system (EWMS)^[19], EWMS 采用了 PS/PDI, LDI, DTI 和 CGLSI 这 4 种较有潜力的检测技术。目前 6 镜系统的装调正在进行中,装调初始阶段,采用动态测量范围较大的 DTI 和 CGLSI 进行检测^[20],6 镜系统各视场点波像差为 0.71~1.67 λ 时,DTI 的重复精度达到了 RMS 0.07 nm, CGLSI 的重复精度达到了 RMS 0.27 nm。此外,检测速度和动态范围也是检测设备的重要技术指标,表 1 给出了几种重要检测技术的检测精度、检测速度和动态测量范围。

表 1 几种 EUVL 投影物镜波像差在线检测技术的性能指标

Table 1 Performance specifications of several at-wavelength wavefront metrology techniques for EUVL optics

Technique	PS/PDI	LDI	PLSI	DTI	CGLSI	DLSI
Measurement accuracy / (nm RMS)	0.04~0.08	0.24	0.81	0.2	0.15	0.96
Measurement speed / (min/full field)	42	44	24	17	17	20
Dynamic range / (nm RMS)	0~1			0~14		

2.1 PS/PDI 和 LDI

PS/PDI 是 H. Medeck 等^[21,22] 在 1996 年提出的,这种设计很好地解决了传统点衍射干涉仪^[23] 参考光透过率较低的问题,并且增加了移相测量的功能。如图 1 所示,光源发出的光束经过待测物镜物面针孔滤波后,由 PS/PDI 的二元光栅分束,经过待测物镜后,携带了待测物镜波像差信息,在待测物镜

像面上形成了若干个衍射级;PS/PDI 的点衍射板位于待测物镜像面,0 级光通过针孔衍射形成球面参考波,1 级光通过窗口携带了待测物镜波像差信息作为测试波,在 CCD 平面形成干涉条纹;沿垂直光栅刻线的方向驱动光栅,可以在 1 级光中引入周期性的相移,利用多幅移相干涉图计算出待测物镜的波像差。

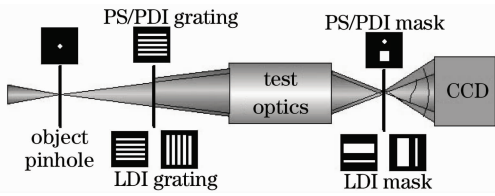


图 1 PS/PDI 和 LDI 原理图

Fig. 1 Principle of PS/PDI and LDI

PS/PDI 的重要特点是其检测精度同待测物镜的数值孔径和波像差有关。随着待测物镜数值孔径的增大,PS/PDI 针孔尺寸变小、针孔加工圆度误差增大、系统透过率下降、干涉条纹对比度降低,造成 PS/PDI 检测精度略有降低^[24]。LBNL 采用 PS/PDI 对不同数值孔径的投影物镜检测结果表明,数值孔径 0.08~0.088 的 Schwarzschild,检测精度为 RMS 0.04 nm^[25];数值孔径 0.1 的 ETS,检测精度为 RMS 0.06 nm^[13];数值孔径 0.3 的 MET,检测精度为 RMS 0.08 nm^[5]。当待测物镜自身存在较大的波像差时,针孔衍射产生的球面参考波面误差增大,同时,0 级衍射光焦斑较大导致系统透过率下降,干涉条纹对比度降低乃至无法探测。因此,PS/PDI 的动态范围较小^[11],通常用在 EUVL 投影物镜装调到接近衍射极限分辨率的精装调阶段。

LDI 同 PS/PDI 原理相似,如图 1 所示,LDI 利用狭缝衍射在空间一维方向上产生理想波面作为参考波,参考波同窗口透过的测试波发生干涉,形成干涉条纹。由于狭缝衍射波面仅在垂直于狭缝的方向上为理想波面,所以必须进行空间正交方向上的两次测量获得待测物镜的波像差。LDI 的显著特点是采用狭缝代替针孔,避免了 PS/PDI 中针孔易被碳污染物堵塞的问题,同时系统透过率得到了明显的提高,可以有效地解决检测大数值孔径投影物镜时干涉图信噪比降低的问题^[26]。

2.2 PSLSI,DTI,CGLSI 和 DLSI

在 EUVL 投影物镜的初调阶段,通常采用基于剪切干涉原理的检测技术,利用其较大的动态测量范围,对投影物镜波像差进行定量检测、反馈和装调。日本 EUVA 的研究表明^[20],基于剪切干涉原理的检测技术,动态测量范围可以达到优于 RMS 1 λ,约为 14 nm,而检测精度也可以达到亚纳米量级。

PSLSI 采用了横向剪切干涉测量原理,如图 2 所示,携带投影物镜波像差信息的会聚球面波由二元光栅衍射,在像面形成多个衍射级次;级次选择掩模板遮挡其他衍射级次,两个窗口仅通过 ±1 级衍

射光,形成干涉条纹;沿垂直光栅刻线的方向驱动光栅,可以在 ±1 级衍射光中引入周期性的相移,从而采集多幅相移干涉图。PSLSI 采用横向错位后的待测波面同其本身发生干涉,干涉条纹解相的结果为空间一维方向上待测波面的微分,因此需要进行正交方向上的两次测量,通过积分运算重构待测波面。

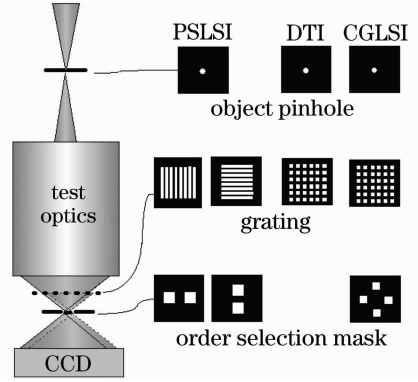


图 2 PSLSI,DTI 和 CGLSI 原理图

Fig. 2 Principle of PSLSI, DTI and CGLSI

PSLSI 的检测精度受剪切比计算误差、系统几何误差、移相误差、光栅加工和定位误差以及 CCD 探测器的倾斜和量化误差等因素的影响。日本 EUVA 的仿真研究结果表明^[27],考虑到以上几种误差源,PSLSI 的检测精度可以达到 RMS 0.007 λ,约为 0.1 nm。总体来说,剪切比越大,检测精度越高:剪切比为 0.033 时,检测精度可以达到 RMS 0.003 λ;而剪切比为 0.017 时,检测精度为 RMS 0.005 λ。日本 EUVA 的实验结果表明^[17],PSLSI 的检测精度仅为 RMS 0.81 nm,同仿真的结果存在较大的差距。主要原因为 PSLSI 测量过程中需要更换光栅,完成正交方向上的两次测量,光栅的轴向定位误差 ΔZ 会造成两次测量结果中干涉条纹载波频率的偏移,通过解相运算波面重构时会导致较大的像散误差。研究表明^[26],为了将像散误差限制在 RMS 0.1 nm 之内,在待测投影物镜数值孔径为 0.2 时,ΔZ 要小于 24 nm。DTI 和 CGLSI 技术可以有效地解决这个问题,只需要进行一次测量即可完成波面重构,避免了光栅轴向定位误差 ΔZ 所导致的像散误差。

DTI 是由 Taketa 等^[28]在 1984 年提出的,采用傅里叶变换法 (FTM) 对多光束干涉形成的泰伯 (Talbot) 像进行频域滤波,提取波面相位。如图 2 所示,DTI 技术采用二维光栅替代 PSLSI 中的一维光栅,光栅同待测物镜像面的距离满足 Talbot 条件时,携带待测物镜波像差信息的多束光干涉将光栅

成像在 CCD 上。DTI 利用傅里叶变换法在频域分析干涉条纹,通过两次计算分别提取 X 方向和 Y 方向的待测波面微分,再利用微分泽尼克(Zernike)多项式拟合的方法得到 Zernike 系数表示的待测物镜波面相位。DTI 的核心思想是对 Talbot 像的傅里叶频谱加窗进行数字滤波并提取相位,由于光栅的轴向位置必须满足 Talbot 条件,并且相邻衍射级次的杂散光容易造成频谱混叠现象,会影响 DTI 的重复检测精度。日本 EUVA 对数值孔径 0.2 的 Schwarzschild 物镜的装调实验表明,通过标定 CCD 倾斜误差,以及杂散光混叠误差^[19],DTI 的检测精度可以达到 RMS 0.2 nm^[18]。

针对 DTI 所存在的问题,CGLSI 在 DTI 和 PLSI 的基础上改进设计,如图 2 所示,在待测物镜像面上放置级次选择窗口,选择 X 方向和 Y 方向的 ± 1 级衍射光在 CCD 表面形成四光束干涉条纹。CGLSI 同样采用了傅里叶变换法对干涉条纹进行频域加窗滤波,提取待测投影物镜波面相位。CGLSI 实质上结合了 PLSI 和 DTI 的优点,采用了空域和频域的双域滤波手段,有效地抑制了相邻衍射级次杂散光对测量结果的影响,同时光栅的轴向位置也不必受到 Talbot 条件的限制。美国 LBNL 对数值孔径 0.1 的 ETS 物镜装调结果表明^[29],CGLSI 的检测精度可以达到 RMS 0.014 λ , 约为 0.18 nm。日本利用 CGLSI 对数值孔径 0.2 的 Schwarzschild 物镜进行装调时^[18],检测精度也能达到 RMS 0.15 nm,充分验证了 CGLSI 的检测精度。

与以上检测技术采用横向剪切干涉不同,DLSI 的光路中采用位于待测物镜的共轭面上两个光栅,利用各级次衍射光之间传播方向不同,产生剪切干涉条纹。如图 3 所示,照明系统的出射光束由光栅 G1 衍射,待测物镜物面的级次选择窗口 M1 使 0 级和 +1 级衍射光通过,经过投影物镜后携带了投影物镜波像差信息;由于光栅 G2 位于 G1 的共轭面上,G1 的 0 级和 +1 级衍射光在 G2 处完全重叠,使得照明系统所导致的像差完全抵消,因此 DLSI 不需要物面针孔滤波,可以极大地提高系统的透过率;G1 的 0 级光通过 G2 衍射后的 +1 级衍射光,同 G1 的 +1 级光通过 G2 衍射后的 0 级衍射光,在投影物镜像面焦点位置完全重合,利用级次选择窗口 M2 仅使这两束光通过;由于两束光焦点位置完全重合,仅是传播方向不同使得波面错位,因此干涉条纹不包含载波频率,降低了测量对振动的敏感性,同时摆

脱了密集条纹对 CCD 采样频率的限制,有利于采用移相法提高解相计算的精度^[30]。DLSI 同样需要正交方向上的两次测量,得到空间二维方向上波面微分,通过积分运算重构待测波面;测量过程中,可以沿垂直光栅刻线方向移动 G1 或 G2 采集多幅相移干涉图,采用移相法分析干涉条纹。

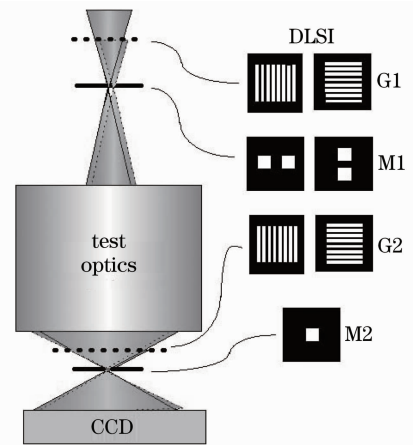


图 3 DLSI 原理图

Fig. 3 Principle of DLSI

目前 DLSI 技术正处于研发阶段,日本 EUVA 也提出了一些标定 DLSI 系统误差的方法^[31]。但是同 PS/PDI 的检测结果对比实验表明,DLSI 检测精度较低,主要是由于照明系统的像差所导致的^[31],目前 DLSI 的检测精度可以达到 RMS 0.96 nm^[17]。

3 EUVL 投影物镜波像差在线检测的关键技术

对比以上几种检测技术可以看出,EUVL 投影物镜波像差在线检测专用设备应具备的特点包括:高精度、大动态范围、利用曝光光源检测。另外,为了满足良率和产量的要求,检测设备必须集成在 EUVL 光刻机中,实现投影物镜波像差的定期检测、快速检测和实时校正。因此,EUVL 投影物镜波像差在线检测设备研制应解决以下几个关键技术。

1) 高精度的光学干涉测量技术

目前的 EUVL 投影物镜波像差在线检测技术,无一例外地采用了光学干涉测量技术。光学干涉测量技术作为一种精密、有效的计量测试技术,是进行高分辨成像系统波像差检测的重要手段,具有高精度、高灵敏度、快速、非接触等优点。然而,EUVL 投影物镜波像差的在线检测高精度、高集成度、利用曝光光源等特点,使得众多传统的干涉仪如泰曼-格

林(Twyman-Green)、斐索(Fizeau)、萨瓦(Savart)等失去了作用,因此适用 EUVL 的干涉测量技术需要具备以下特点:(1)由于缺乏高精度的极紫外波段在线面形检测设备,所以一般不采用标准镜;(2)由于需要极紫外波段的在线检测,所以避免采用折射式的光学元件,一般采用衍射光学元件;(3)极紫外光源较差的相干性,要求必须共路干涉;(4)嵌入 EUVL 曝光系统在线检测的要求,使得干涉仪的结构应简化,便于系统集成;(5)高精度的检测要求,使得干涉仪结构参数优化和高精度系统误差标定技术的研究成为重点。

2) 干涉图像处理技术

干涉图像处理是光学干涉测量中的关键技术,直接决定着干涉测量的精度和速度。干涉图像处理的一般步骤包括预处理、相位提取、相位展开和波面拟合。在实际应用过程中,应根据干涉测量原理、测量误差补偿、干涉图区域形状、干涉条纹形状、疏密程度和对比度等特点,采用相应的干涉图像处理方法,以提高解相计算的精度和速度。难点是剪切干涉图像的处理,其波面重构精度不仅受波面相关性、噪声等的影响,与剪切比也有一定联系,在干涉仪设计时应协同考虑。

3) 干涉仪关键器件的制备

干涉仪关键器件的制备需要采用微细加工技术,加工误差直接影响干涉仪的检测精度。例如,检测数值孔径 0.25 以上投影物镜的 PS/PDI 针孔直径一般小于 50 nm^[5],一般采用聚焦离子束刻蚀厚度约为 150 nm 的镍(Ni)或钽(Ta)等金属薄膜制备^[16],需要严格控制工艺以减小侧壁角。目前适用于极紫外波段的衍射光学元件都为振幅型器件,能够提高干涉仪性能的相位型衍射元件的制备工艺也是目前的研究方向^[32]。

除了以上提及的关键技术之外,极紫外的高真空腔体、碳污染物吹扫、高精密隔振等一系列实验环境控制问题也不可忽视。总之,EUVL 投影物镜波像差在线检测设备的研发任重道远,学科交叉性强,需要各种技术和工艺水平的共同提高。

4 结 论

介绍了 EUVL 投影物镜波像差在线检测技术的最新研究进展,主要有 PS/PDI, LDI, CGLSI, DTI, PLSI 和 DLSI 6 种检测技术和仪器。检测精度最高的是 PS/PDI(RMS 0.04~0.08 nm),通常用 PS/PDI 来标定其他技术的检测精度。但是

PS/PDI 的动态测量范围较小(RMS 0~1 nm),检测速度相对较慢(全视场检测时间 40 min),并且当待测物镜自身像差较大时,PS/PDI 检测精度有所下降。PLSI, DLSI 和 CGLSI 具有较大的动态测量范围(RMS 0~14 nm)和较快的检测速度(全视场检测时间 20 min),检测精度受待测物镜自身像差影响较小,很好地弥补了 PS/PDI 的不足。

目前,利用数值孔径 0.2~0.3 的 EUVL 投影物镜可以实现 32 nm 乃至 22 nm 光刻技术,PS/PDI 的检测精度可以达到 RMS 0.08 nm,完全可以满足检测精度的要求;基于剪切干涉原理的 CGLSI 技术,弥补了 PS/PDI 动态测量范围小,检测速度相对较慢的缺点,并且具备较高的检测精度(RMS 0.15 nm)。通常,在 EUVL 投影物镜的装调过程中,首先采用刀口检验等定性检测手段完成粗调;在微调的初始阶段,采用动态测量范围较大的 CGLSI 技术,将投影物镜波像差控制在 RMS 1 nm 以内;最后,采用 PS/PDI 完成高精度的检测和精调。

EUVL 进一步发展到 16 nm 技术节点,PS/PDI 技术中针孔直径需要达到 16 nm 左右,此时对于 PS/PDI 技术而言,存在着针孔的加工圆度误差、针孔对准、系统透过率以及干涉条纹对比度降低等一系列难题,需要探索更合适的检测方法和技术。如果能进一步提高检测精度,LDI 技术将是一种有潜力的候选技术。

参 考 文 献

- 1 H. Kinoshita. Present and future requirement of soft X-ray projection lithography[C]. *SPIE*, 1992, **1742**: 576~584
- 2 T. Sasaki, K. Kajiyama, H. Morishima *et al.*. Performance estimation of EUV exposure optics for below 32 nm node in consideration of Mo/Si multilayer coating [C]. *SPIE*, 2007, **6517**: 65171
- 3 K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo *et al.*. Development of optics for EUV lithography tools[C]. *SPIE*, 2007, **6517**: 65170
- 4 K. Sugisaki, M. Hasegawa, M. Okada *et al.*. EUVA's challenges toward 0.1 nm accuracy in EUV at-wavelength interferometry[C]. *In Proc. on Fringe 2005, Springer Berlin Heidelberg* 2005: 252~266
- 5 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, P. E. Denham *et al.*. At-wavelength alignment and testing of the 0.3 NA MET optic[J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 2004, **22**(6): 2956~2961
- 6 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, P. E. Denham *et al.*. EUV interferometry of the 0.3 NA MET Optic[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 69~74
- 7 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, E. Anderson *et al.*. Extreme ultraviolet microexposures at the advanced light source using the 0.3 numerical aperture micro-exposure tool optic[J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 2004, **22**(6): 2962~65
- 8 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, P. E. Denham *et al.*. EUV interferometric testing and alignment of the 0.3 NA MET optic [C]. *SPIE*, 2004, **5374**: 64~73

- 9 T. Miura, K. Murakami, K. Suzuki *et al.*. Nikon EUVL development progress update[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69240
- 10 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, S. B. Rekawa *et al.*. Ultra-high accuracy optical testing: creating diffraction-limited short-wavelength optical systems[C]. *SPIE*, 2005, **5910**: 591016
- 11 K. A. Goldberg. Testing extreme ultraviolet optical systems at-wavelength with sub-angstrom accuracy [C]. *Fabrication and Testing of Aspheres*, 1999, T: T7
- 12 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, E. Anderson *et al.*. At-wavelength characterization of the extreme ultraviolet engineering test stand set-2 optic[J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 2001, **19**(6): 2396~2400
- 13 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, J. Bokor *et al.*. Honing the accuracy of extreme ultraviolet optical system testing: at-wavelength and visible-light measurements of the ETS set-2 projection optic[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 329~37
- 14 K. Sugisaki, Y. Zhu, Y. Gomei *et al.*. Present status of the ASET at-wavelength phase-shifting point diffraction interferometer[C]. *SPIE*, 2000, **4146**: 47~53
- 15 K. Murakami, J. Saito, K. Ota *et al.*. Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes[C]. *SPIE*, 2003, **5037**: 257~64
- 16 T. Hasegawa, C. Ouchi, M. Hasegawa *et al.*. EUV wavefront metrology system in EUVA[C]. *SPIE*, 2004, **5374**: 797~807
- 17 K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu *et al.*. Comparisons between EUV at-wavelength metrological methods [C]. *SPIE*, 2005, **5921**: 59210
- 18 C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa *et al.*. EUV wavefront metrology at EUVA[C]. *SPIE*, 2006, **6152**: 61522
- 19 S. Kato, C. Ouchi, M. Hasegawa *et al.*. Comparison of EUV interferometry methods in EUVA project [C]. *SPIE*, 2005, **5751**: 110~17
- 20 K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki *et al.*. EUV wavefront measurement of six-mirror optic using EWMS[C]. *SPIE*, 2008, **6921**: 69212
- 21 H. Medeck. Phase-shifting point diffraction interferometer[P]. U. S. Patent 5835217, 1998
- 22 H. Medeck, E. Tejn, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 23 R. N. Smartt, J. Strong. Point diffraction interferometer[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1972, **62**(5): 737
- 24 K. A. Goldberg, E. Tejn, J. A. Bokor. 3D numerical study of pinhole diffraction to predict the accuracy of EUV point diffraction interferometry[C]. *Extreme Ultraviolet Lithography, OSA Trends in Optics and Photonics. Optical Society of America*, 1996: 133~137
- 25 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee. Extreme-ultraviolet phase-shifting point-diffraction interferometer: a wavefront metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7252~7263
- 26 M. Hasegawa, C. Ouchi, T. Hasegawa *et al.*. Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA [C]. *SPIE*, 2004, **5533**: 27~36
- 27 Y. Zhu, K. Sugisaki, C. Ouchi *et al.*. Lateral shearing interferometer for EUVL: theoretical analysis and experiment [C]. *SPIE*, 2004, **5374**: 824~832
- 28 M. Takeda, S. Kobayashi. Lateral aberration measurements with a digital Talbot interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(11): 1760~1764
- 29 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, J. Bokor. Extreme ultraviolet carrier-frequency shearing interferometry of a lithographic four-mirror optical system[J]. *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 2000, **18**(6): 2939~2943
- 30 Z. Liu, M. Ishii, Y. Zhu *et al.*. Double-grating lateral shearing interferometer for extreme ultraviolet lithography[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(6B): 3718~3721
- 31 Z. Liu, M. Okada, K. Sugisaki *et al.*. Double-grating lateral shearing interferometer for EUV optics at-wavelength measurement[C]. *SPIE*, 2005, **5752**: 663~672
- 32 P. P. Naulleau, J. A. Liddle, F. Salmassi *et al.*. Design and fabrication of advanced EUV diffractive elements[C]. *SPIE*, 2004, **5347**: 39~45