

基于调制传递函数的极紫外干涉光刻 分辨率影响因素研究

赵俊^{1,2} 孟祥雨² 郭智² 王勇² 吴衍青² 邵仁忠² 陈宜方¹

1(复旦大学 超构表面光场调控重点实验室 上海 200433)

2(中国科学院上海高等研究院 上海 201203)

摘要 极紫外干涉光刻(Extreme Ultraviolet Interference Lithography, EUV-IL)被广泛应用于极紫外光刻胶的光刻性能检测,并在其研发中发挥着重要作用。要实现高分辨的EUV-IL仍然面临诸多挑战和限制,而发展可定量分析光刻分辨率影响因素的光学仿真方法将成为解决这些问题的关键途径。本文构建了基于互强度(Mutual Optical Intensity, MOI)的仿真模型,以评估光栅加工偏差、光子噪声及振动条件等因素对EUV-IL系统调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)的影响。仿真结果表明:在 $75\text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的光功率密度下,光子噪声会导致对比度降低至0.75,而将机械振动控制在 2.5 nm 均方根(Root Mean Square, RMS)以内则能有效改善光刻效果。通过基于仿真结果逐一优化光源EUV-IL系统的相关影响因素,成功实现了 12.5 nm 分辨率的干涉图案曝光。实验结果亦验证了MTF分析的合理性。

关键词 极紫外干涉光刻, 光刻性能检测, 分辨率, 互强度, 调制传递函数

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240451

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240451

Study on factors affecting the resolution of extreme ultraviolet interference lithography based on modulation transfer function

ZHAO Jun^{1,2} MENG Xiangyu² GUO Zhi² WANG Yong² WU Yanqing² TAI Renzhong² CHEN Yifang¹

1(Shanghai Key Laboratory of Metasurfaces for Light Manipulation, Fudan University, Shanghai 200433, China)

2(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China)

Abstract [Background] Extreme ultraviolet interference lithography (EUV-IL) is widely used for evaluating the lithographic performance of extreme ultraviolet photoresists and plays an important role in their development. However, achieving high-resolution EUV-IL still faces numerous challenges and limitations. [Purpose] This study aims to develop optical simulation methods capable of quantitatively analyzing the factors affecting lithographic resolution in EUV-IL systems. [Methods] A mutual optical intensity (MOI) simulation model based on statistical optics was developed to assess the impact of various factors on the modulation transfer function (MTF) of the EUV-IL system. Firstly, grating fabrication deviations of less than 1 nm were analyzed through the MOI model to evaluate

国家自然科学基金(No.12335019, No.61927820)、国家重点研发计划(No.2021YFA1601003, No.2021YFA1601002)资助

第一作者: 赵俊, 男, 1980年出生, 2005年于武汉理工大学获硕士学位, 研究领域为光电子材料

通信作者: 陈宜方, E-mail: yifangchen@fudan.edu.cn; 孟祥雨, E-mail: mengxy@sari.ac.cn

收稿日期: 2024-11-10, 修回日期: 2025-01-25

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12335019, No. 61927820), National Key R&D Program of China (No. 2021YFA1601003, No. 2021YFA1601002)

First author: ZHAO Jun, male, born in 1980, graduated from Wuhan University of Technology with a master's degree in 2005, focusing on optoelectronic materials

Corresponding authors: CHEN Yifang, E-mail: yifangchen@fudan.edu.cn; MENG Xiangyu, E-mail: mengxy@sari.ac.cn

Received date: 2024-11-10, revised date: 2025-01-25

their effects on aerial image contrast. Then, photon noise effects were simulated at a photon power density of $75 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ to determine contrast degradation. Finally, vibration conditions ranging from 1.5 nm to 10 nm root mean square (RMS) were systematically investigated to establish their relationship with spatial image quality, and experimental verification was performed in the EUV-IL system at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF).

[Results] The simulation results demonstrate that photon noise reduces the contrast to 0.75 at a power density of $75 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Mechanical vibration significantly affects resolution performance, with vibrations exceeding 2.5 nm RMS causing substantial contrast degradation. The EUV-IL system at SSRF achieves interference pattern exposure with a resolution of 12.5 nm when mechanical vibration is controlled within 2.5 nm RMS and 4 nm EUV-IL resolution can be achieved by controlling vibration amplitude below 1.5 nm RMS. **[Conclusions]** Simulation results of this study show that mechanical vibration plays a critical role in limiting the lithographic resolution of EUV-IL systems whilst the photon noise is a significant factor that cannot be ignored. The experimental results verify the rationality of the MTF analysis and provide important technical support for EUV photoresist development.

Key words EUV-IL, Lithography performance evaluation, Resolution, MOI, MTF

随着人工智能、云计算、移动通信和物联网等领域的快速发展,市场对高端芯片的需求日益增强,而高端芯片的制造能力通常以工艺节点为标志。光刻技术是芯片制造的核心技术,极紫外光刻技术(Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL)作为当前业内最先进的主流光刻技术,已广泛应用于 7 nm 及以下工艺节点的芯片制造^[1-3]。EUVL 采用 13.5 nm 波长的极紫外光(Extreme Ultraviolet, EUV)进行投影式曝光。其中 EUV 光刻胶(Extreme Ultraviolet photoresist)是 EUVL 技术的核心组成部分,其性能直接影响芯片制造的工艺水平^[4-6]。

在 EUV 光刻胶的研发过程中,分辨率、线边缘粗糙度(Line Edge Roughness, LER)以及灵敏度等指标是评估其性能的关键因素^[7-9]。对这些指标的准确检测是 EUV 光刻胶研发中不可或缺的环节,检测准确度直接影响研发的进度。商用 EUV 光刻机本应该是实施相关检测的最佳选择,但由于其技术复杂性、高昂的成本以及易受污染等一系列原因,实际应用中,一些模拟商用 EUV 光刻机的 EUV 曝光装置,如干涉光刻、微场曝光和泰保光刻装置等,替代商用 EUV 光刻机承担了光刻胶研发中的主要检测任务。其中,极紫外干涉光刻方法采用的透射光学元件相较于钼硅多层膜反射光学元件更易于加工,其理论极限曝光分辨率仅受掩模光栅的衍射条件限制,理论上可优于 4 nm,是目前检测 EUV 光刻胶光刻性能的一种国际常用方法^[10-11]。

同步辐射可以产生高亮度和高空间相干性的 EUV 光源,是开展干涉光刻的一种理想光源。自 20 世纪 90 年代以来,国际上多个研究机构,如麻省理工学院、瑞士光源的 XIL 线站、威斯康辛大学、日本 NewSubaru 光源的 BL09B 线站以及韩国 Pohang 光源的 4A1 线站等,已相继开展基于同步辐射光源的

极紫外干涉光刻(Extreme Ultraviolet Interference Lithography, EUV-IL)研究,并基于该方法提供 EUV 光刻胶的光刻性能检测服务,在 EUV 光刻胶的研发中发挥了重要作用^[12-17]。上海光源的软 X 射线干涉光刻(X-ray Interference Lithography, XIL)线站于 2012 年建成并向用户开放,是目前国内唯一开展该实验方法的装置^[18-21]。

随着新一代高数值孔径 EUV 光刻机分辨率达到 10 nm 的应用,与之配套的 EUV 光刻胶也面临着更高的要求。相应的检测方法的分辨率水平也必须与之同步。曝光分辨率是评价 EUV-IL 装置性能的核心指标之一。要实现高分辨率的 EUV-IL 图案,仍需克服一系列挑战和限制,这依赖于对干涉光刻系统各个因素的深入理解和持续优化。在这个过程中,实现对 EUV-IL 分辨率影响因素的量化分析显得尤为重要。在信息光学领域,调制传递函数是在分辨率和对比度方面量化系统整体成像性能的最佳工具之一^[22-23]。本文提出利用统计光学中的互强度(Mutual Optical Intensity, MOI)精确描述同步辐射光源的分布,发展 MOI 经过光学元件的传播算法^[24-25],获得同步辐射 EUV-IL 在光刻胶区域的光强分布,并结合定量化的调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)分析方法,对影响光刻分辨率的各相关要素进行深入分析,以指导 EUV-IL 系统的曝光分辨率性能优化。

1 EUV-IL 系统的光学仿真

1.1 上海光源 EUV-IL 系统

上海光源 EUV-IL 系统采用了椭圆极化波荡器,提供高亮度部分相干的 EUV 光源。系统的光学布局如图 1 所示。狭缝 1 和狭缝 2 均采用四刀狭缝,其

中狭缝1用于定义光束的水平和垂直接收角,同时吸收大部分辐照功率以保护下游光学组件。狭缝2用于获得高相干次级光源,其光子通量和相干性可以通过狭缝开口尺寸进行调节。柱面镜1和柱面镜2均采用金镀层。柱面镜1将入射光水平偏转 1.5° ;柱面镜2再额外偏转光束 10° 以降低下游热负载,并抑制高次谐波。一个毫秒级响应快门配备在狭缝2下游,用于精确控制曝光剂量。掩模样品台被置于真空度优于 10^{-5} Pa的真空腔内,以控制掩模光栅的

姿态、样品的曝光位置以及样品与掩模光栅之间的工作距离。真空腔放置在一个主动隔离平台上,由空气浮动系统控制,以确保曝光的稳定性。在光束线的末端,采用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机观测光束经过光栅掩模后的光斑均匀性。在掩模样品台上还安装了一套激光干涉仪(Attocube systems AG, FPS3010),用于监测掩模与样品之间在水平和垂直方向上的相对位移,以实现曝光过程中振动情况的原位精确评估。

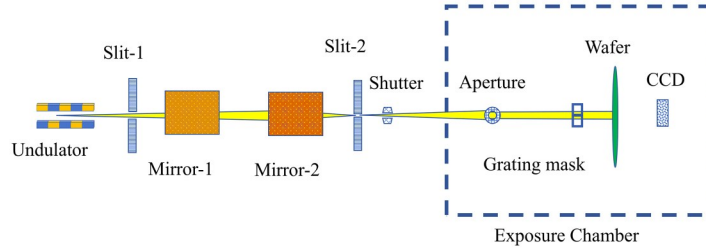


图1 上海光源XIL线站布局图
Fig.1 Schematic diagram of the XIL beamline at SSRF

1.2 原理与仿真模型

EUV-IL是指两束或多束相干EUV光束之间通过干涉产生周期性光强分布,并用于光刻胶曝光的技术,原理如图2所示。其分辨率通常是指其在光刻胶上所能产生的可识别干涉曝光图案的最小半周期(Half-pitch, HP),在理论情况下,其由产生分束光的掩模光栅的周期和干涉所采用的衍射级次所决定^[26],可通过式(1)计算:

$$R = P_g / 4N \quad (1)$$

式中: P_g 是光栅的周期; N 是衍射级次。而在光刻胶上所形成的光强分布则可以通过式(2)描述^[27]:

$$I = 2A^2(1 + \cos(2kx \sin \theta)) \quad (2)$$

式中: A 是振幅; θ 是入射角; x 是 x 轴上位置; $k=2\pi/\lambda$ 是波数。

空间像(Aerial Image)是指光线从光源发出通

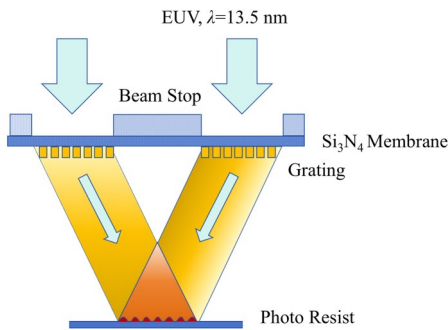


图2 极紫外干涉光刻原理图(彩图见网络版)
Fig.2 A schematic diagram of the EUV-IL concept (color online)

过成像系统在光刻胶上所形成光强分布的图像。空间像分析能够揭示光刻系统在传递不同空间频率的细节时的效率和失真情况。本文采用MOI精确描述同步辐射光源的光强、相位和任意两点间的相干性分布,发展算法对同步辐射EUV-IL进行仿真计算。本算法分割波前为大量小面元^[28],小面元在远小于光斑尺寸和相干长度的情况下振幅和相位可认为是均匀一致且完全相干的。再以此为基础,通过菲涅尔积分分别计算每个面元的波前传播,并对全体面元叠加以模拟光在自由空间的相干性传播。本算法能准确模拟部分相干光条件下的光束传播,帮助分析部分相干光条件下光源和曝光系统的各项参数对干涉曝光光强分布的影响。

互强度通过自由空间 $J(P_1, P_2)$ 从源平面到像平面的传播由式(3)^[29]表示为:

$$J(Q_1, Q_2) = \iint \iint J(P_1, P_2) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)} \frac{x(\theta_1)}{\lambda r_1} \frac{x(\theta_2)}{\lambda r_2} dS_1 dS_2 \quad (3)$$

式中: λ 是波长; r_1 和 r_2 分别是 P_1 到 Q_1 和 P_2 到 Q_2 的距离; $\chi(\theta_1)$ 和 $\chi(\theta_2)$ 分别是倾角 θ_1 和 θ_2 的倾斜因子; S_1 和 S_2 分别是源的表面。

EUV-IL系统掩模光栅的振幅传输函数可以由式(4)表示:

$$T(P) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} nt\right) \quad (4)$$

式中: t 是掩模光栅的栅线高度; n 是栅线材料的折射率。

考虑光栅振幅传输函数对光源互强度 $J(P_1, P_2)$ 的影响,建立经过光栅的互强度分布如下:

$$J_{\text{out}}(P_1, P_2) = T(P_2)^* J_{\text{in}}(P_1, P_2) T(P_1) \quad (5)$$

式中: $J(P_1, P_2)$ 是光栅入射平面处的互强度。结合式(3)和式(5),可以获得曝光区域处的互强度分布。

1.3 调制传递函数

在信息光学领域,MTF是用来描述光学系统将信息从物体传递到图像能力的重要工具。它能够在分辨率和对比度方面量化系统的整体成像性能。在EUV-IL系统中,当采用一级衍射级次时,干涉光束的空间频率由分束光栅的周期所决定。此外,干涉条纹的空间像对比度可被视为图像信号的调制度。通过对EUV-IL空间像的模拟,可以获取传递过程中的对比度信息。在MTF分析框架下,研究不同空间频率下干涉光刻系统的细节分辨率,将为优化光刻技术提供重要依据。这一方法不仅有助于理解光刻系统的成像特性,还能指导调节光学参数,以提升光刻分辨率和图像质量。MTF函数及调制度由式(6)和式(7)表示^[30]:

$$\text{MTF} = \frac{M_1}{M_0} \quad (6)$$

$$M_1 = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} \quad (7)$$

式中: M_1 表示经过干涉光刻系统后的调制度; M_0 则是信号传递前的调制度,通常设定为理论值1; I_{max} 为图像上的最大光强, I_{min} 为图像上的最小光强。若系统为理想状态,所有频率信息均被平等地传递,系统的MTF值为1;而在没有信息传递到图像的情况下,MTF值为0。

MTF具有级联特性,即一个光学系统的MTF等于影响该光学系统的各个单元MTF的乘积。这一特性为分析干涉光刻中各要素对分辨率的影响提供了便利。在EUV-IL系统中,当光束经过掩模光栅时,不同衍射级次的干涉条纹的信号频率由光栅周期所决定,同时其空间像呈现正弦分布。这些特征均符合MTF的分析条件。在利用MTF进行分析时,干涉条纹空间像对比度的计算是建立MTF的基础。本文将采用MOI模型来计算EUV-IL空间像的对比度,因为该模型能够准确模拟部分相干光条件下的光束传播,还便于分析在部分相干光条件下光源和曝光系统的各项参数对干涉曝光光强分布的影响。

2 实验验证

一组EUV-IL实验在上海光源的XIL线站(线站

编号:BL08U1B)进行,以验证各影响因素对曝光图案的影响。实验所用的光栅掩模结构如下:支撑层为100 nm厚的氮化硅隔膜,表面结构由光栅和零级光阻挡层两部分组成。光栅结构采用电子束光刻直接在预制好的氮化硅隔膜上制备,光栅的栅线材料为HSQ(Hydrogen Silsesquioxane)光刻胶电子束曝光后形成的交联材料。在EUV-IL实验中,一块复合掩模光栅被用于同时产生分辨率分别为30 nm、25 nm、20 nm和15 nm的干涉图案。首先,在一块5 cm硅晶圆片上旋涂上一层厚度为40 nm的PMMA光刻胶(主要成分为聚甲基丙烯酸甲酯,供应商为Allresist,型号为AR-P672.01),随后样品在180 °C条件下烘烤90 s。EUV-IL曝光采用0.2 cm宽的光阑设置,掩模处的EUV光功率强度控制在75 mW·cm⁻²,对应的光子通量为2×10¹⁴ photons·s⁻¹,光斑区域为0.2 cm×0.2 cm。样品在范围为150~1 500 mJ·cm⁻²的不同曝光剂量条件下进行曝光,所对应的曝光时间为2~20 s。曝光后,样品使用稀释比例为1:3的甲基异丁基酮与异丙醇混合液显影45 s,然后用乙醇冲洗30 s,最后用氮气进行干燥。最终的PMMA图案的分辨率和表面变化通过原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, AFM)进行表征。

3 结果与讨论

光学仿真在光学工程领域具有广泛的应用,显著提高了设计效率并改善了光学系统的性能。本文亦通过模拟不同的EUV-IL空间像对比度条件并调整光学组件的参数,进而优化EUV-IL系统的设计,以提高曝光质量。根据MOI模型,本文在一级衍射条件下模拟了一组由两块60 nm周期光栅构成的掩模光栅所产生的干涉条纹。单个光栅的宽度为120 μm,两块光栅之间的间距为390 μm。仿真基于上海光源XIL线站的光学参数,其中光斑尺寸为1 245 μm,相干长度为3 889 μm。在光栅区域内,相位分布近似为平面波分布。由于相干长度远大于光斑尺寸,因此可以将光栅区域视为全相干光。

3.1 光栅周期误差对空间像对比度的影响

光栅的周期误差是指在光栅加工过程中,实际加工的光栅周期与设计周期之间的差异。这种误差会对光栅的性能产生影响。在仿真中,周期误差通常通过计算指定区域内的周期变化的平均值来获得。图3(a)展示了在0.9 nm周期误差条件下,0.8 μm的宽度空间内干涉条纹的模拟强度分布。图3(b)显示,在电子束光刻中,随着光栅周期误差的增加,EUV-IL空间像的对比度下降。在实际的光栅制

造过程中,光栅周期的误差可以控制在 1 nm 以内。因此,在当前的光栅制造工艺条件下,空间像对比度

几乎不受光栅周期误差的影响。

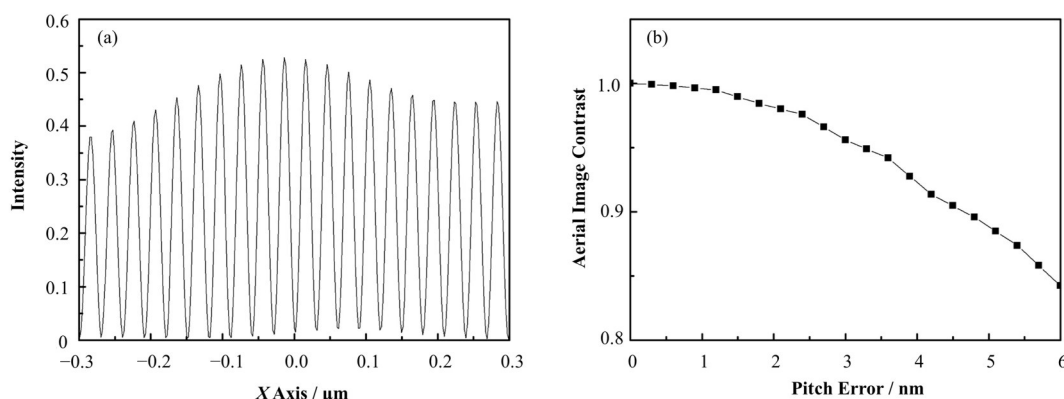


图3 模拟结果 (a) 干涉区域的归一化强度分布图, (b) 空间像对比度与光栅周期误差之间的关系
Fig.3 The simulated results (a) Normalized intensity profiles in interference region, (b) Relationship between the aerial image contrast and grating pitch error

3.2 光栅 LER 对空间像对比度的影响

LER 指的是在光刻或其他微纳米制造过程中,线条边缘形状的不规则性。这种不规则性通常表现为边缘沿线的波动、凹陷或突出,影响图案的精确性和一致性。光栅的 LER 也是影响干涉图案对比度的因素之一。仿真所采用的 LER 数据基于光刻胶

实际边界与平均边界之间差异的标准偏差。在不同 LER 条件的仿真中,光栅的周期保持不变,而光栅的线宽则随机波动。图 4(a)展示了在 LER 设为 1 nm 时,0.8 μm 宽度范围内干涉条纹的强度分布。图 4(b)显示,光栅 LER 的增加会导致对比度下降,但下降速度非常缓慢。

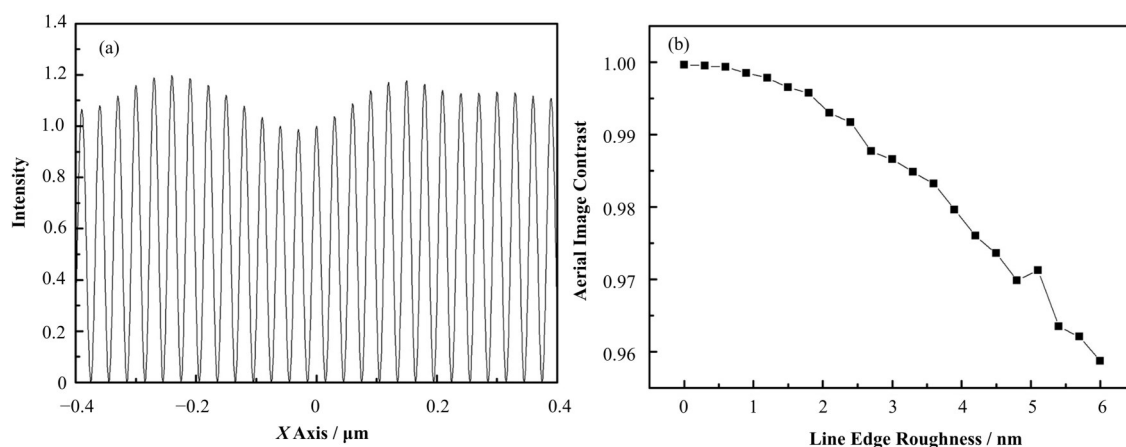


图4 模拟结果 (a) 干涉区域的归一化强度分布图, (b) 空间像对比度与光栅线宽偏差(LER)之间的关系
Fig.4 The simulated results (a) Normalized intensity profiles in the interference region, (b) Relationship between the aerial image contrast and the grating LER

3.3 光子噪声对空间像对比度的影响

曝光区域的光子噪声源于光子泊松分布。在对光子噪声对空间像对比度影响的仿真中,使用 MOI 模型计算了不同通量条件下干涉条纹的强度分布。基于总光子通量和强度分布,获得了条纹中的光子密度分布。通过将光子噪声加入条纹的仿真中,得到了空间像对比度,如图 5 所示。在光功率密度为 $75 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,光子噪声导致对比度降低至 0.75。

该结果表明,在 EUV-IL 过程中,光子噪声对曝光图案的影响不可忽视。

3.4 振动幅度对空间像对比度的影响

本文所提及的机械振动是指在曝光过程中掩模光栅与样品之间的相对位移。数据采用均方根(Root Mean Square, RMS)值进行处理。图 6(a)展示了在 10 nm 振动条件下,0.8 μm 宽度范围内干涉

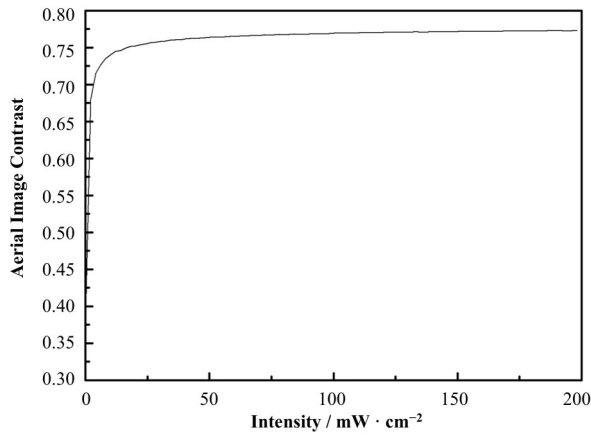


图5 模拟结果:干涉区域空间像对比度与光子噪声之间关系

Fig.5 Simulation results of the relationship between the aerial image contrast and photon noise

条纹的强度分布。在图6(b)中,EUV-IL 空间像对比度与振动幅度的关系被绘制出来。可以发现,当振动幅度超过 2.5 nm 时,空间像对比度会发生显著下降。

3.5 MTF 曲线分析

MTF 曲线是评估光刻系统光学质量的重要方

法。它反映了光刻系统在不同空间频率下传递对比度的能力,作为定量标准,用于衡量系统将物体细节转化为图像的能力。基于 MOI 模型计算的空间像对比度数据,模拟不同振动条件下的 MTF 曲线可以分析振动对曝光图案质量的影响,如图 7(a)所示。图中的横轴为空间频率,单位设定为每微米线对(lp/μm),纵轴为 MTF 值。EUV-IL 系统的 MTF 可以用式(8)表示:

$$MTF(f) = C_{err}(f) \cdot C_{rou}(f) \cdot C_{noi}(f) \cdot C_{vib}(f) \cdot C_{coh}(f) \quad (8)$$

式中: C_{tol} 、 C_{rou} 、 C_{noi} 、 C_{vib} 和 C_{coh} 分别是光栅周期误差、线边粗糙度、光子噪声、振动和空间相干性等条件所对应的空间像对比度; f 是空间频率。在 MTF 的计算中,光栅的周期误差设定为 1 nm,LER 设定为 4.2 nm,光子噪声所对应的空间像对比度影响 $C_{err}(f)$ 设定为 0.75,空间相干性对空间像对比度影响 $C_{coh}(f)$ 设定为 0.98。在 MTF 曲线中,如图 7(a)所示,虚线在 0.1 处定义了临界对比度值^[31]。当 MTF 值低于该水平时,光刻图案将无法识别。对于振动幅度大于 10 nm 的情况,系统无法获得具有 15 nm 分辨的干涉条纹图案。通过降低振动,系统的光刻分辨率可以显著提高。

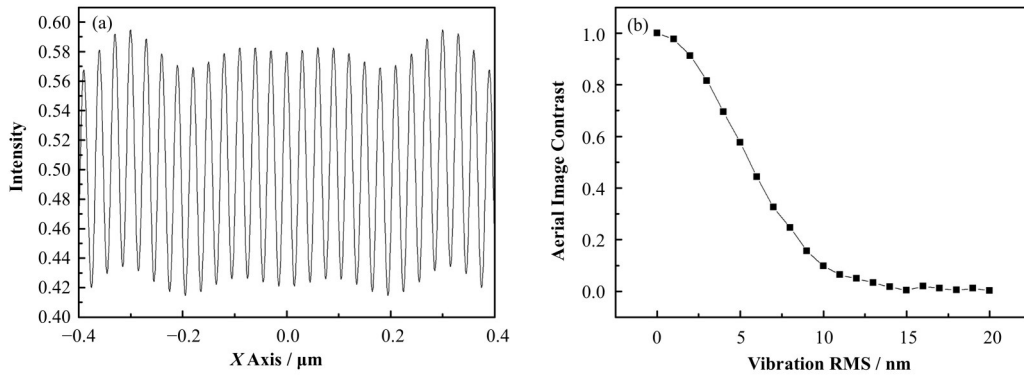


图6 模拟结果 (a) 干涉区域的归一化强度分布图,(b) 空间像对比度与振动条件之间的关系

Fig.6 The simulated results (a) Normalized intensity profiles in the interference region, (b) Relationship between the aerial image contrast and the vibration condition

图 7(b)中的仿真数据是基于 2.5 nm(RMS) 振动条件下使用 MOI 模型计算得出的。同时,测量的对比度值以圆折线表示,这些数据来源于图 8 所示的 AFM 结果,基于 AFM 测定的 PMMA 图案深度与 PMMA 薄膜原始厚度的比例进行建立。结果显示,测量值的趋势与仿真结果一致,这进一步验证了 MTF 曲线的特性,表明高频信号传输对比度方面的能力较弱。由于光刻空间像转化为光刻图案的过程复杂,受到光刻胶特性以及光刻和显影工艺等多重因素的影响。图中的模拟数据与测量数值的偏差,

主要原因是 PMMA 光刻胶在 EUV 曝光条件下无法实现 15 nm 及以下的分辨率。这一特性限制了光刻过程的精度,影响了最终图案的质量。

3.6 上海光源 EUV-IL 系统优化

针对上海光源 EUV-IL 系统,通过排查相关振动源,包括质谱仪风扇和空调滤网风扇,并已将其移除,这些措施有效提升了实验设备的稳定性。在 300 Hz 以下,掩模与样品之间的水平位移在 1 min 内稳定在 2.5 nm(RMS),为后续高分辨率干涉曝光提供了良好保障。目前基于 HSQ 光刻胶,已成功获

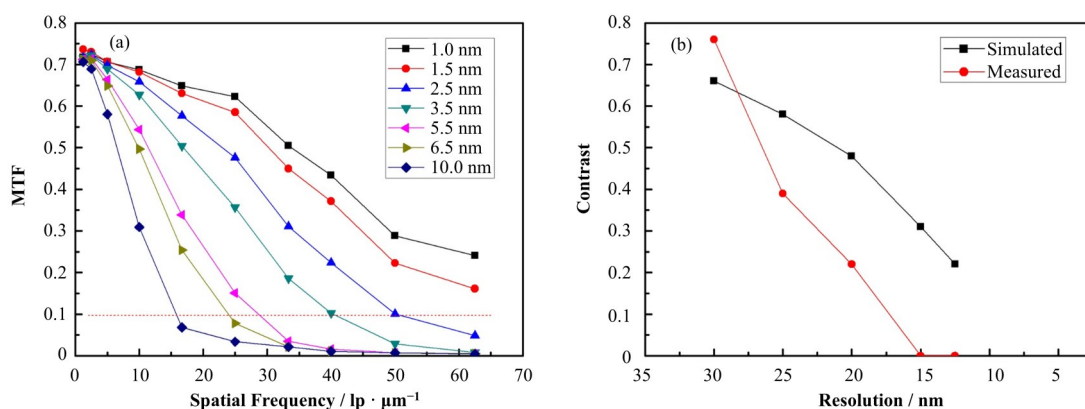


图7 模拟结果(彩图见网络版) (a) 不同振动条件下的MTF曲线,(b) 2.5 nm(RMS)振动条件下干涉条纹的对比度的模拟与其对应的实测值之间的比较

Fig.7 The simulation results (color online) (a) Depicts the modulation transfer function (MTF) curves derived from simulations under various vibration conditions, (b) Presents a comparison between the contrast of simulated interference fringes and their corresponding measured values at the vibration condition of 2.5 nm (RMS)

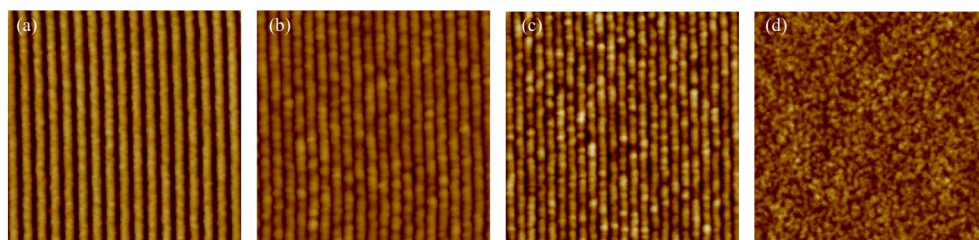


图8 EUV-IL制备的不同分辨条件下的PMMA光刻胶图案的AFM结果(彩图见网络版)

(a) 30 nm, (b) 25 nm, (c) 20 nm, (d) 15 nm

Fig.8 AFM images of PMMA photoresist patterns fabricated by EUV-IL under different resolution conditions (color online)

(a) 30 nm half-pitched, (b) 25 nm half-pitched, (c) 20 nm half-pitched, (d) 15 nm half-pitched

得从 20 nm 到 12.5 nm 的不同分辨率的干涉光刻图案,如图9所示。然而,当分辨率提升至 12.5 nm 时,

图案的对比度会显著下降。

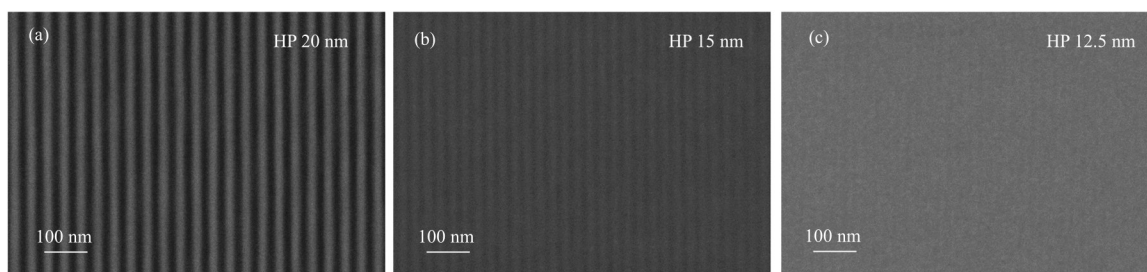


图9 采用极紫外干涉光刻获得的不同分辨率的HSQ光刻胶干涉条纹的扫描电子显微镜图片

(a) 20 nm, (b) 15 nm, (c) 12.5 nm

Fig.9 SEM images of HSQ photoresist interference patterns with different resolutions obtained by EUV-IL

(a) 20 nm half-pitched, (b) 15 nm half-pitched, (c) 12.5 nm half-pitched

4 结语

综上所述,本文采用MOI模拟方法,量化分析了MTF的演变,探讨了光栅加工偏差、机械振动和光子噪声等因素对EUV-IL分辨率的影响。研究结果表明,机械振动在限制EUV-IL系统光刻分辨率方面发挥着关键作用,而光子噪声也是不可忽视的重

要因素,特别是在光功率密度较低时,会显著降低干涉图案的对比度。相较之下,光栅掩模的周期误差和LER对分辨率的影响相对较小。相关实验结果验证了MTF分析的合理性。研究还发现,要实现4 nm的EUV-IL分辨率,需持续改善系统的隔振条件,确保振动幅度控制在1.5 nm(RMS)以下。这些工作为上海光源EUV-IL系统的分辨能力提升提供

了重要指导^[32],也为EUV光刻胶的研发提供了重要的技术支持。此外,进一步研究光刻胶对图案对比度的传递影响,将有助于获得更精确的模拟结果。

作者贡献声明 赵俊负责实验设计、数据收集、文章撰写及最终稿的修订;孟祥雨负责部分模拟计算;郭智和王勇负责计算模型的指导工作;吴衍青和邵仁忠对文章的知识性内容进行批评性审阅,并协助获取研究经费以及提供行政、技术或材料支持;陈宜方负责实验方案的指导及对文章的审阅与指导工作。

参考文献

- 1 Van Schoot J. The Moore's law machine: the next trick to tinier transistors is high-numerical-aperture EUV lithography[J]. IEEE Spectrum, 2023, **60**(9): 44 - 48. DOI: 10.1109/MSPEC.2023.10234175.
- 2 Roncaglia A. Advanced lithography[M]. Springer Handbook of Semiconductor Devices, 2023: 279 - 308. DOI: 10.1007/978-3-030-79827-7_8.
- 3 Erdmann A, Fühner T, Evanschitzky P, *et al.* Optical and EUV projection lithography: a computational view[J]. Microelectronic Engineering, 2015, **132**: 21 - 34. DOI: 10.1016/j.mee.2014.09.011.
- 4 Chauhan M, Palit K, Choudhary S, *et al.* Ultrasensitive metal-organic cluster resist for patterning of single exposure high numerical aperture extreme ultraviolet lithography applications[J]. Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2022, **21**(4): 044603. DOI: 10.1117/1.jmm.21.4.044603.
- 5 De Silva A, Ekinici Y. Special section guest editorial: non-chemically amplified resists for EUV lithography[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2022, **21**(4): 041401. DOI: 10.1117/1.jmm.21.4.041401.
- 6 Allenet T, Wang X, Vockenhuber M, *et al.* Progress in EUV resist screening towards the deployment of high-NA lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2021, **11609**: 116090J. DOI: 10.1117/12.2583983.
- 7 Ekinici Y, Vockenhuber M, Mojarad N, *et al.* EUV resists towards 11nm half-pitch[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V. San Jose, California, USA. SPIE, 2014: 904804. DOI: 10.1117/12.2046459.
- 8 Singh V, Satyanarayana V S V, Batina N, *et al.* Performance evaluation of nonchemically amplified negative tone photoresists for e-beam and EUV lithography[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, **13**: 043002. DOI: 10.1117/1.JMM.13.4.043002.
- 9 Chen J P, Hao Q S, Wang S Q, *et al.* Molecular glass resists based on 9, 9'-spirobifluorene derivatives: pendant effect and comprehensive evaluation in extreme ultraviolet lithography[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2019, **1**(3): 526 - 534. DOI: 10.1021/acsapm.8b00235.
- 10 Fukushima Y, Yamaguchi Y, Iguchi T, *et al.* Development of interference lithography for 22 nm node and below[J]. Microelectronic Engineering, 2011, **88**(8): 1944 - 1947. DOI: 10.1016/j.mee.2011.02.076.
- 11 Nagai T, Nakagawa H, Naruoka T, *et al.* Novel high sensitivity EUV photoresist for sub-7 nm node[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, **29**(3): 475 - 478. DOI: 10.2494/photopolymer.29.475.
- 12 Yen A, Schattenburg M L, Smith H I. Proposed method for fabricating 50-nm-period gratings by achromatic holographic lithography[J]. Applied Optics, 1992, **31**(16): 2972 - 2973. DOI: 10.1364/ao.31.002972.
- 13 Solak H H, He D, Li W, *et al.* Exposure of 38 nm period grating patterns with extreme ultraviolet interferometric lithography[J]. Applied Physics Letters, 1999, **75**(15): 2328 - 2330. DOI: 10.1063/1.125005.
- 14 Wallace J, Cheng Y C, Isoyan A, *et al.* A novel EUV exposure station for nanotechnology studies[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, **582**(1): 254 - 257. DOI: 10.1016/j.nima.2007.08.124.
- 15 Gronheid R, Solak H H, Ekinici Y, *et al.* Characterization of extreme ultraviolet resists with interference lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2006, **83**(4 - 9): 1103 - 1106. DOI: 10.1016/j.mee.2006.01.149.
- 16 Yoshifuji M, Niihara S, Harada T, *et al.* Fabrication of high-aspect-ratio transmission grating using DDR process for 10 nm EUV resist evaluation by EUV interference lithography[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, **58**: SDDA02. DOI: 10.7567/1347-4065/ab049f.
- 17 Kim K, Lee J W, Park B G, *et al.* Investigation of correlative parameters to evaluate EUV lithographic performance of PMMA[J]. RSC Advances, 2022, **12**(5): 2589 - 2594. DOI: 10.1039/d1ra07291a.
- 18 YANG S M, WANG L S, ZHAO J, *et al.* Developments at SSRF in soft X-ray interference lithography[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(1): 010101. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.26.010101.

- 19 姚镇, 焦禹晨, 赵波, 等. 同步辐射扫描透射 X 射线显微成像系统振动的闭环控制方法研究[J]. 核技术, 2024, **47**(9): 090101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090101.
YAO Zhen, JIAO Yuchen, ZHAO Bo, *et al.* Research on synchronous radiation scanning transmission X-ray microscopy system closed-loop control method[J]. Nuclear Techniques, 2024, **47**(9): 090101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.090101.
- 20 李海涛, 赵波, 张祥志, 等. 便携式同步辐射原位激光加热装置研制[J]. 核技术, 2023, **46**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020101.
LI Haitao, ZHAO Bo, ZHANG Xiangzhi, *et al.* Development of a portable laser heating device for synchrotron radiation *in situ* experiment[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(2): 020101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.020101.
- 21 夏慧娟, 吴衍青, 张磊, 等. 非相干光点扩散函数的重建及其在同步辐射成像系统中的应用[J]. 核技术, 2020, **43**(1): 010101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010101.
XIA Huijuan, WU Yanqing, ZHANG Lei, *et al.* Reconstruction of point spread function of incoherent light by redundant information extraction and its application in synchrotron radiation imaging system[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(1): 010101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010101.
- 22 Sabri N, Dugan E T, Jacobs A M, *et al.* An adapted modulation transfer function for X-ray backscatter radiography by selective detection[C]. San Diego, CA: Hard X-ray and Gamma-ray Detector Physics IX SPIE, 2007: 670614. DOI: 10.1117/12.739070.
- 23 Grigorova V, Giri P, Bevitt J J, *et al.* Optimisation of a neutron imaging system using the modulation transfer function[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1057**: 168754. DOI: 10.1016/j.nima.2023.168754.
- 24 Meng X Y, Guo C L, Wang Y, *et al.* Research on partially coherent light propagation in synchrotron beamlines[J]. Acta Optica Sinica, 2013, **33**(7): 0734001. DOI: 10.3788/aos201333.0734001.
- 25 Meng X Y, Xue C F, Yu H N, *et al.* Numerical analysis of partially coherent radiation at soft X-ray beamline[J]. Optics Express, 2015, **23**(23): 29675 - 29686. DOI: 10.1364/OE.23.029675.
- 26 Buitrago E, Fallica R, Fan D, *et al.* From powerful research platform for industrial EUV photoresist development, to world record resolution by photolithography: EUV interference lithography at the Paul Scherrer Institute[C]//UV and Higher Energy Photonics: From Materials to Applications. San Diego, California, USA. SPIE, 2016: 99260T. DOI: 10.1117/12.2238805.
- 27 Wang X L, Kazazis D, Tseng L T, *et al.* High-efficiency diffraction gratings for EUV and soft X-rays using spin-on-carbon underlayers[J]. Nanotechnology, 2022, **33**(6): 065301. DOI: 10.1088/1361-6528/ac328b.
- 28 Meng X Y, Wang Y, Shi X B, *et al.* Mutual optical intensity propagation through non-ideal two-dimensional mirrors[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2023, **30**(Pt 5): 902 - 909. DOI: 10.1107/S1600577523006343.
- 29 Meng X Y, Yu H N, Wang Y, *et al.* Analysis of partially coherent light propagation through the soft X-ray interference lithography beamline at SSRF[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2021, **28**(Pt 3): 902 - 909. DOI: 10.1107/S1600577521003398.
- 30 Saetiew J, Sanjae J, Meemon P. Real-time assessment of spectrometer alignment using modulation transfer function (MTF) measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, **175**: 108021. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108021.
- 31 Brose S, Danylyuk S, Grüneberger F, *et al.* Industrial photoresist development with the EUV laboratory exposure tool: mask fabrication, sensitivity and contrast [C]. Monterey, USA: International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography (SPIE 2019), 2019: 111471I. DOI: 10.1117/12.2536794.
- 32 Tai R Z, Zhao Z T. Overview of SSRF phase-II beamlines [J]. Nuclear Science and Techniques, 2024, **35**: 137. DOI: 10.1007/s41365-024-01487-1.