

一种基于衍射条纹反演计算的线栅分辨率提升方法

胡锦涛 李捷 胡坚 李昊 陈金平 郭旭东 柯常军 韩胜会 杨国强 樊仲维

A resolution enhancement method for line gratings based on inverse calculation of diffraction fringes

HU Jin-ze, LI Jie, HU Jian, LI Hao, CHEN Jin-ping, GUO Xu-dong, KE Chang-jun, HAN Shenghui, YANG Guo-qiang, FAN Zhong-wei

引用本文:

胡锦涛, 李捷, 胡坚, 李昊, 陈金平, 郭旭东, 柯常军, 韩胜会, 杨国强, 樊仲维. 一种基于衍射条纹反演计算的线栅分辨率提升方法[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0009

HU Jin-ze, LI Jie, HU Jian, LI Hao, CHEN Jin-ping, GUO Xu-dong, KE Chang-jun, HAN Shenghui, YANG Guo-qiang, FAN Zhong-wei. A resolution enhancement method for line gratings based on inverse calculation of diffraction fringes[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

扫描干涉曝光系统中双频激光干涉测量误差建模与分析

Error modeling and analysis of dual-frequency laser interferometry in scanning beam interference lithography system

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 224 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0149>

基于残差网络的结肠内窥镜图像超分辨率重建方法

Super-resolution reconstruction for colorectal endoscopic images based on a residual network

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1022 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0247>

基于计算全息图零位补偿的同轴高次非球面干涉检测技术研究

CGH null compensation testing of high-order coaxial aspherical surfaces

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 237 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0152>

等周期变倾角干涉条纹复用扩展增强现实耦合元件体光栅角度带宽

Expanding the angular bandwidth of augmented reality coupling element volume holographic grating by multiplexing equal-period and variable-inclination-angle interference fringes

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1157 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0050>

奇偶探测超分辨率折射率测量的理论研究

Theoretical investigation on super-resolution refractive index measurement with parity detection

中国光学 (中英文). 2023, 16(2): 434 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0119>

高衍射效率偏振无关合束光栅的双层梯形槽形设计与分析

Design and analysis of a double-layer trapezoidal groove of polarization-independent beam-combining gratings with high diffraction efficiency

中国光学 (中英文). 2025, 18(1): 53 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0083>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-09

一种基于衍射条纹反演计算的线栅分辨率提升方法

胡锦涛^{1,2}, 李捷^{1,2*}, 胡坚^{1,2}, 李昊^{3,4}, 陈金平^{3,4}, 郭旭东^{5,6},

柯常军^{1,2}, 韩胜会⁷, 杨国强⁵, 樊仲维^{2*}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学光电学院, 北京 100049;

3. 中国科学院理化技术研究所光化学转换与功能材料重点实验室, 北京 100190;

4. 中国科学院大学未来技术学院, 北京 100049;

5. 北京分子科学国家研究中心, 中国科学院化学研究所光化学重点实验室, 北京 100190;

6. 中国科学院大学化学科学学院, 北京 100049;

7. 全南国立大学机械工程学院, 韩国光州 61186)

摘要:为低成本、高效率表征 EUV 光刻胶, 本研究构建了一套基于桌面级高次谐波产生 (High-Harmonic Generation, HHG) 源与反射式干涉仪的光刻评估系统。光束线采用 515 nm 飞秒激光激发氙气产生高次谐波, 经轮胎镜聚焦和闪耀光栅分光后, 由狭缝选取第 11 阶谐波 (46.8 nm) 作为 EUV 光源。以磺酸酐酯修饰的聚苯乙烯 (PSOS) 非化学放大型光刻胶为测试对象, 分别采用劳埃镜和对称双镜进行干涉曝光。针对样品面与对称双镜间的对准难题, 提出了一种基于衍射条纹反演计算的光学测距方法, 实现了对称双镜的精确定位。实验结果表明: 采用劳埃镜可实现周期 125 nm、高对比度的清晰线栅图案, 完成待测材料百纳米级分辨率的表征; 经衍射条纹反演法精确定位后, 利用对称双镜可制备出周期 60 nm 的线栅图案, 显著提升了系统的分辨能力。本研究展示的评估系统为光刻胶材料的快速筛选、分辨率极限研究及相关工艺开发提供了一个成本低、可推广的实验平台。

关键词: 高次谐波; 光刻; 干涉曝光; 极紫外

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0009 CSTR: 32171.14.CO.2026-0009

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2024YFE0205800, No. 2021YFB3602600); 中国科学院项目 (No. GJJSTD 20200009, No. 2018-131-S); 国家自然科学基金 (No. 62121003, No. 10010108B1339-2451, No. 62405332, No. 62427901); 北京科学技术委员会项目 (No. Z221100006722008)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2024YFE0205800, No. 2021YFB3602600); Chinese Academy of Sciences (No. GJJSTD20200009, No. 2018-131-S); National Natural Science Foundation of China (No. 62121003, No. 10010108B1339-2451, No. 62405332, No. 62427901); Beijing Municipal Science and Technology Commission (No. Z221100006722008)

A resolution enhancement method for line gratings based on inverse calculation of diffraction fringes

HU Jin-ze^{1,2}, LI Jie^{1,2*}, HU Jian^{1,2}, LI Hao^{3,4}, CHEN Jin-ping^{3,4}, GUO Xu-dong^{5,6}, KE Chang-jun^{1,2}, HAN Shenghui⁷, YANG Guo-qiang⁵, FAN Zhong-wei^{2*}

(1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

2. *School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

4. *School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

5. *Key Laboratory of Photochemistry, Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

6. *School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

7. *School of Mechanical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea 61186)*

* *Corresponding author, E-mail: lijie430@aircas.ac.cn; fanzhongwei@aircas.ac.cn*

Abstract: To enable low-cost and efficient characterization of EUV photoresists, a lithographic evaluation system based on a tabletop high-harmonic generation (HHG) source and a reflective interferometer was developed. High-order harmonics were generated in argon using a 515 nm femtosecond laser. After focusing by a toroidal mirror and spectral dispersion by a blazed grating, the 11th harmonic (46.8 nm) was selected through a slit as the EUV source. Nonchemically amplified resists based on oxime sulfonate-functionalized polystyrene (PSOS) were used as the test material, and interference exposure was performed with a Lloyd's mirror and a symmetric dual-mirror configuration. To solve the alignment problem between the sample plane and the symmetric dual-mirror interferometer, an optical ranging method based on diffraction-fringe inversion was proposed, enabling precise positioning of the symmetric dual-mirror interferometer. The results show that the Lloyd's mirror produces clear high-contrast line-space patterns with a period of 125 nm and enables characterization of the tested resist at the 100 nm scale. After precise positioning by diffraction-fringe inversion, the symmetric dual-mirror configuration produces line-space patterns with a period of 60 nm, significantly improving the system resolution. This evaluation system provides a low-cost and scalable experimental platform for rapid screening of photoresist materials, investigation of resolution limits, and development of related lithographic processes.

Key words: high-order harmonics; lithography; interference exposure; extreme ultraviolet

1 引 言

当今社会对智能芯片的需求推动了集成电路技术的飞速发展,然而,在进一步压缩晶体管尺寸过程中,半导体制造工艺面临着严峻的技术挑战。EUV 光刻作为延续摩尔定律的关键技术^[1],相比传统的深紫外光刻工作波长更短,根据瑞利

判据^[2],其拥有着更高的分辨率前景。EUV 光刻技术依赖于图案转移材料—EUV 光刻胶。目前,常见的测试光刻胶材料分辨率的方法有微场曝光、泰伯光刻以及干涉光刻(Interference Lithography, IL)等^[3-5]。相比于前两者,IL 无需昂贵掩膜与复杂成像元件即可提供高空间像对比度^[6]。Roel Gronheid 等利用瑞士光源同步辐射光束线开展 EUV-IL 实验,对化学放大和非化学放大光

刻胶的极限分辨率与曝光工艺窗口进行评估^[7], 此后大型同步辐射源结合透射光栅的 EUV-IL 方法成为国内外评估光刻胶性能的主流选择^[8-11]。然而, 同步辐射光源机时有限、难以灵活开展高频次实验; 面向量产的商业 EUV 光刻机则因系统复杂昂贵, 较少用于光刻材料的前期探索性研究, 因此业界亟需成本低的替代光源。

HHG 过程所产生的 EUV 源, 具有相干度高、稳定性好等优势^[12], 有望在光刻材料表征领域实现降本增效。受限于高密度透射光栅的低衍射效率^[13], HHG 源目前所能提供的功率更适配于反射式干涉方案。Hyun-su Kim 等利用 HHG 技术获取 29 nm 的 EUV 源, 并采用简易的劳埃镜证明了 HHG 源的干涉光刻能力^[14], 由于驱动光脉冲飞秒级别的脉宽限制, 可干涉区域是有限的。同样基于 HHG-IL 平台, Kevin Dorney 等采用 13.5 nm 的 EUV 源, 在劳埃镜小角度入射条件下进一步提高分辨率至 22 nm 周期, 然而, 反射损失成为阻碍高对比度线栅产生的主要因素^[15]。目前, 验证 HHG 源对于 EUV 光刻胶的表征能力成为新的研究热点。Hiroki Yamamoto 等采用 13.5 nm 的 EUV 源测试了无机-有机杂化光刻胶材料的灵敏度, 得到结果与以往研究相近^[16]。Ethan Flores 等采用波导结构的 HHG 源, 测试了 ZEP-520A 光刻胶在 30 nm 波长下的灵敏度、对比度, 并获得周期 110 nm 的二维点阵图案^[17]。

为推动 EUV-IL 技术在高分辨率材料表征中的应用, 并服务于先进 EUV 光刻胶的研发, 本文研究了基于 HHG 光源与反射式干涉仪相结合的光刻评估方案。利用劳埃镜干涉结构, 在 PSOS 光刻胶上获得了百纳米周期的高对比度线栅图案。在此基础上, 进一步分析了残胶图案中直边衍射条纹的分布规律, 并据此提出了一种精确调控对称双镜与光刻胶平面间距的方法, 制备出周期为 60 nm 的线栅图案, 显著提升了系统分辨率。本文构建的 HHG-IL 系统为光刻材料研发中的高分辨率线栅制备提供了一条可行的技术路径。

2 干涉光刻原理

2.1 EUV 的产生与优化

气体 HHG 过程中, 飞秒脉冲与惰性气体间

的高阶非线性作用会辐射出基频光频率数倍的谐波成分, 此过程与微观单原子响应有关。根据半经典三步模型相关理论^[18], 截止光子能量(产生谐波的最短波长)取决于驱动光的波长、强度以及气体种类, 表达式为:

$$E_{\text{cutoff}} = I_p + 3.17U \quad (1)$$

式中, I_p 代表气体原子的电离势能, $U \propto I\lambda^2$, 代表有质动力势能, I 、 λ 分别代表驱动光光强、波长。

经过宏观传播, 最终只有满足相位匹配条件的谐波成分才得以保留, 这也是 EUV 谐波优化的重要理论基础。本研究通过实验迭代优化气体池的结构参数, 从而获取高通量谐波输出。为抑制重吸收效应, 需要使瑞利长度略大于气体池直径, 据此确定气体池管道内径为 2 mm。为满足最佳相位匹配条件, 进一步通过压力扫描实验确定了氙气的最优工作气压为 95 mbar。同时, 调节气体池与激光焦点的相对位置, 获得了最优的空间对准。

2.2 EUV 单色仪设计

HHG 后的同轴相干光混杂有各级谐波成分和较高强度的基频光, 对于目标波长的表征与提取通过单色仪完成, 结构组成如图 1 所示:

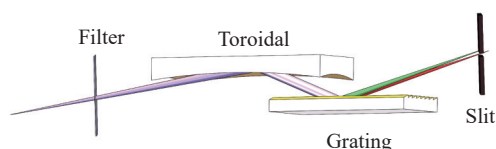


图 1 由金属膜、轮胎镜、闪耀光栅以及狭缝组合的单色仪
Fig. 1 Monochromator composed of a metal film, a toroidal mirror, a blazed grating, and a slit

首先设置金属膜, 用于阻挡基频光, 同时透过有限波段的谐波成分。后续轮胎镜结合闪耀光栅构成了简易光谱仪系统。谐波源通过轮胎镜点对点成像于 CMOS 相机处(物、像距相等, 均为轮胎镜等效焦距的二倍), 闪耀光栅将不同级次的谐波分离开。相机采集到谐波光斑数据后, 结合金属膜透过率曲线完成谐波级次的标定。表征目标波长后, 转动轮胎镜调节传播方向, 接入狭缝滤波实现单色化。

2.3 反射式干涉仪周期计算

反射式干涉仪选用经典劳埃镜和对称双镜装置, 其光刻分辨率(线栅周期)通过图 2 所示的光

线干涉关系得到, P 、 P' 分别表示曝光平面上沿 X 轴上的任意干涉点。

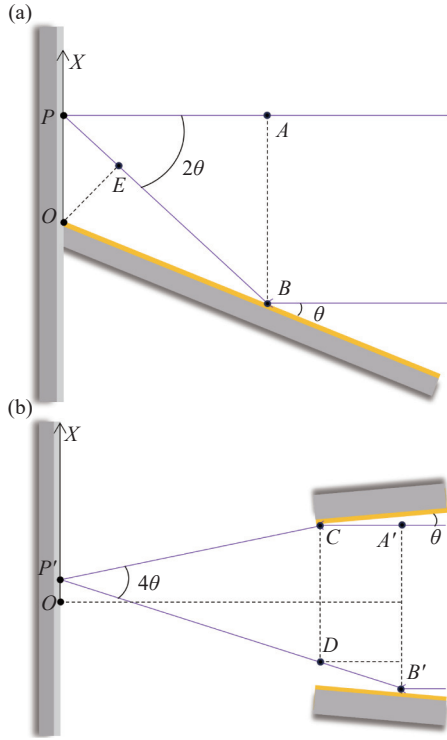


图 2 (a) 劳埃镜干涉光刻中几何关系图; (b) 对称双镜干涉光刻中几何关系图

Fig. 2 Geometric configurations in (a) Lloyd's-mirror and (b) symmetric dual-mirror interference lithography

图 2(a) 中 AB 表示平行光(波长为 λ) 的波前, 与曝光平面平行。入射角表示入射光线与反射镜表面法线的夹角, 而 θ 为入射角的余角。 BP 、 AP 分别代表波前 AB 传播后, 反射光、直射光所历经的光程。几何关系计算可得, EP 、 EB 分别为 $x \cdot \sin(2\theta)$ 、 $x \cdot \cos(2\theta) / \tan(\theta)$, 其中 x 表示线段 OP

的长度。 X 轴上任一干涉点 P 的光程差 (Optical Path Difference, OPD) 表示为:

$$OPD = EP + EB - AP = x \cdot \sin(2\theta) \quad (2)$$

当光程差变化量为一个波长时, 即 $\Delta OPD = \lambda$, 则对应驻波场会变化一个线栅周期, 由此可得:

$$d = \lambda / \sin(2\theta) \quad (3)$$

图 2(b) 所示对称双镜装置中, $A'B'$ 表示平行光的波前, θ 仍与入射角互余。因波前 $A'B'$ 先后反射, 传播到干涉点 P' 前, 两束反射光存在光程不等的两部分 (图示 $B'D$ 与 $A'C$)。 $A'C$ 表示为 $4x' \cdot \cot(2\theta) \cos^2(\theta)$, 其中 x' 表示线段 OP' 的长度。 $B'D$ 表示为 $\cos(2\theta)$ 。同理, X 轴上任一干涉点 P' 的 OPD' 表示为:

$$OPD' = B'D - A'C = 2x' \cdot \sin(2\theta) \quad (4)$$

依据光程差与周期的对应关系进一步得到:

$$d' = \lambda / 2 \sin(2\theta) \quad (5)$$

3 实验装置

图 3 所示的整体光路仅占据两张光学平台, 光束线前端的商用 Yb:KGW 飞秒激光器产生中心波长为 1030 nm 的红外激光(脉宽 190 fs, 重频 4 kHz, 单脉冲能量 900 μ J), 通过 0.5 mm 厚的硼酸钡 (BBO) 晶体倍频后, 输出功率最大 1.9 W, 中心波长 515 nm 的水平偏振态驱动光场。驱动光经 M1、M2 反射镜反射后通过透镜 L1 聚焦到充满氩气的气体池中, 辐射出多级次谐波成分。

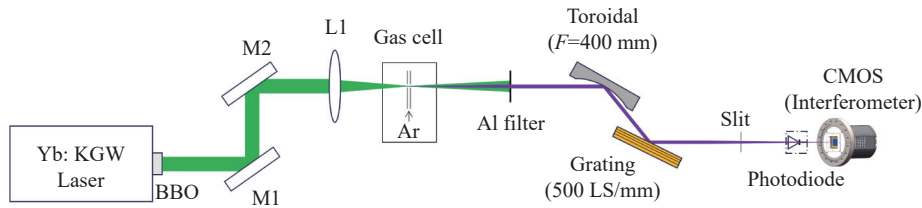


图 3 EUV 光刻光束线

Fig. 3 EUV lithography beamline

通过动态调节光阑大小、焦点位置和气压, 实时监测 EUV 光斑强度(如图 4 所示)实现 HHG 过程的相位匹配。采用 200 nm 厚度的铝膜滤除掉驱动光。接入光谱仪分光后, 得到光谱成分如

图 5 所示, 谐波主要包含基频光的 7 阶、9 阶、11 阶、13 阶成分。

综合考虑短波长和高强度, 利用狭缝选用 11 阶谐波(46.8 nm)作为 IL 主波长。为验证光源

稳定性, 使用 CMOS 相机(型号 Dhyana XF95, 像元尺寸 $11\ \mu\text{m}$, 像元数 2048×2048)实测光斑能量变化曲线如图 6 所示, 启动后连续 1 h 工作的不稳定性均方根小于 2%。采用光电二极管(型号 AXUV 100G)测得 11 阶谐波光通量为 $0.1\ \mu\text{W}$ 。

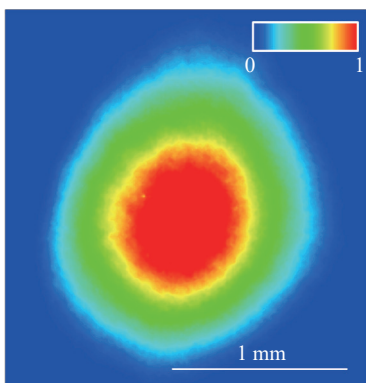


图 4 实现相位匹配后, 铝膜后 300 mm 处的 EUV 光斑形貌
Fig. 4 EUV beam profile at 300 mm behind the aluminum film after phase matching

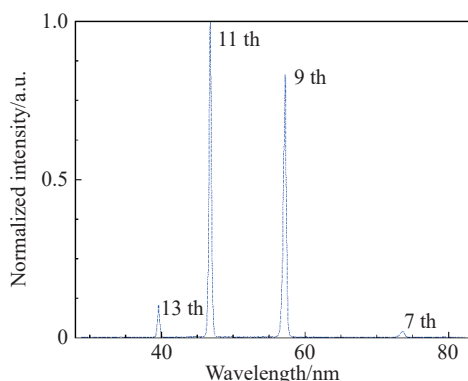


图 5 铝膜后的 EUV 光谱分布图

Fig. 5 EUV spectrum behind the aluminum film

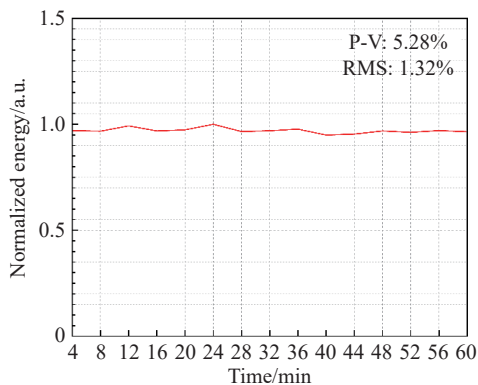


图 6 11 阶谐波的能量变化

Fig. 6 Energy variation of the 11th-order harmonic

根据谐波功率对时间的积分和光斑面积可以标定曝光剂量, 但因谐波光斑强度分布不完全均

匀, 仅能给出区域内剂量的平均值, 计算方法由下式给出:

$$E = \frac{it}{s\eta}, \quad (6)$$

式中, s 和 t 分别代表曝光面积和曝光时间, i 代表光电流计采集数据, η 是光电流计的电流示数与入射光功率间的比例系数, 为 $0.26\ \text{A/W}$ (波长为 $46.8\ \text{nm}$ 时)。

实验采用旋涂厚度为 $32\ \text{nm}$ 的 PSOS 光刻胶样品 (EUV 波段可支持 $36\ \text{nm}$ 周期图案化^[19]) 验证系统的分辨能力。在劳埃镜装置中, 镀金镜紧贴在旋涂有 PSOS 的硅片上, 光束中心与图 2(a) 中 O 点相重合即可完成曝光。

为解决劳埃镜中干涉臂强度不等造成的线栅对比度损失问题, 选用规格一致的镀金反射镜, 组装对称双镜装置如图 7 所示。

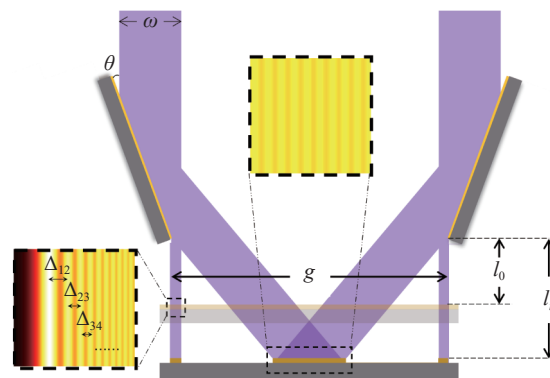


图 7 对称双镜装置图, l_0 、 l_i 分别为镜面边缘与光刻胶平面的初始距离、理想距离

Fig. 7 Schematic diagram of the symmetric dual-mirror setup, where l_0 and l_i denote the initial and ideal distances, respectively, from the mirror edge to the photoresist plane

光线入射角的余角仍为 θ , 则干涉焦深 $h = \omega/\sin(2\theta)$, 最佳干涉成像距离的计算式为:

$$l_i = \frac{1}{2} \left(\frac{g + \omega}{\tan 2\theta} - \frac{\omega}{\tan \theta} \right), \quad (7)$$

式中, ω 为干涉光束直径, g 为对称双镜边缘之间的距离, 标示于图 7。

4 分析与讨论

4.1 线栅结构分析

曝光后的样品采用负显影工艺进行显影: 使

用乙酸丁酯显影 30 s, 再使用乙酸丁酯漂洗 30 s, 最后使用氮气气枪吹扫 15-30 s。利用扫描电子显微镜(S8230, Hitachi, JPN)获取部分曝光图像如图 8 所示。

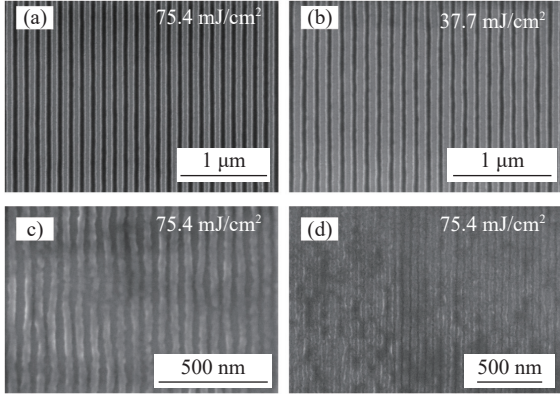


图 8 (a)、(b) 劳埃镜 ($\theta = 10^\circ$) 制备的线栅; (c) 劳埃镜 ($\theta = 20^\circ$) 制备的线栅; (d) 对称双镜 ($\theta = 10^\circ$) 制备的线栅

Fig. 8 Line gratings fabricated by (a), (b) Lloyd's mirror ($\theta = 10^\circ$); (c) Lloyd's mirror ($\theta = 20^\circ$) and (d) symmetric dual-mirror ($\theta = 10^\circ$).

实验记录光电流约为 27 nA、11 阶谐波光斑面积约为 0.05 mm^2 (能量阈值百分比为 $1/e^2$) 以及单个样品的曝光时长, 由式(6)计算得到曝光剂量并标识于图 8 图像右上角。

图 8(a) 和 (b) 均为劳埃镜 ($\theta = 10^\circ$) 制备的线栅, 周期为 125 nm, 且对比度良好。(b) 图的曝光时间较短 (90 s), 使得线栅占空比发生变化。

图 8(c) 为劳埃镜 ($\theta = 20^\circ$) 获得的结果, 线栅周期约为 60 nm, 可观察到结构扭曲, 边缘粗糙 (对比度显著下降) 现象, 这源于镀金镜大角度下的光能反射损失 (反射率仅有 0.45^[20])

对称双镜 ($\theta = 10^\circ$) 达到了 60 nm 分辨率, 曝光结果见图 8(d)。线栅对比度不高的原因是 11 阶谐波光斑强度分布的不均匀性, 如图 9 所示。相对于距离近、强度相似的 b_1 、 b_2 点, 相距较远的 a_1 、 a_2 点之间的强度变化剧烈, 而前、后者分别是劳埃镜、对称双镜取用光斑区域内的一对干涉光束。

完成多组光刻实验 (包含劳埃镜、对称双镜) 后, 记录线栅周期变化结果如下图所示:

图 10 显示线栅周期数据波动幅度小, 证明了光刻装置的稳定性。劳埃镜 ($\theta = 20^\circ$) 和对称双镜 ($\theta = 10^\circ$) 中出现个别较大偏差值 (图 10 红色点,

对应红色框内图像), 原因推断为对应线栅质量较差, 加大了周期测量误差。周期数据均值与式 (3)、(5) 计算结果不完全相同, 这源于反射镜摆放角度与预设角度存在微小偏差。

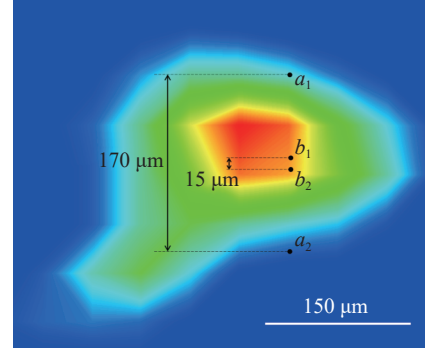


图 9 11 阶谐波的光斑形貌

Fig. 9 Beam profile of the 11th harmonic

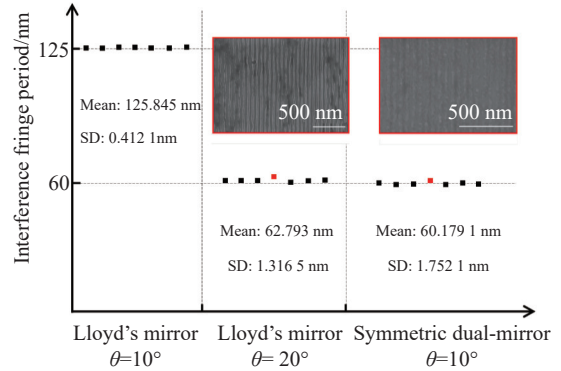


图 10 劳埃镜 ($\theta = 10^\circ$ 、 20°) 和对称双镜 ($\theta = 10^\circ$) 所制备的线栅周期数据

Fig. 10 Measured periods of line gratings fabricated by Lloyd's mirror ($\theta = 10^\circ$, 20°) and symmetric dual-mirror interferometer ($\theta = 10^\circ$)

4.2 直边衍射条纹分析

图 7 中大部分光线经过反射镜反射, 用于干涉光刻, 少部分光线通过镜面边缘, 用于产生菲涅耳直边衍射条纹。曝光显影后, 电镜记录到衍射条纹间距变化的图案, 其分布规律可直边衍射光强分布式(8)计算得到:

$$I(x) = \frac{I_0}{2} \left\{ \left[\frac{1}{2} + C(v) \right]^2 + \left[\frac{1}{2} + S(v) \right]^2 \right\}, \quad (8)$$

式中, I_0 为通过镜边缘前的光强, $C(v)$ 、 $S(v)$ 是菲涅耳积分 (余弦和正弦形式)。 $v = x \sqrt{2/\lambda l}$, x 代表一维坐标, λ 是波长, l 是镜边缘与曝光平面的距离。

此式说明, 当入射光波长确定后, 得到的衍射

条纹分布规律仅由 l 确定, 由此发展出一种基于衍射条纹反演计算的定位方法。

具体流程参考图 7, 首先测量初始曝光图案中前几级衍射条纹间距 (Δ_{ij}) 分别为: $\Delta_{12} = 0.665 \mu\text{m}$ 、 $\Delta_{23} = 0.437 \mu\text{m}$ 和 $\Delta_{34} = 0.352 \mu\text{m}$ 。逐个代入反演公式(9)求解, 得到三个解, 取平均后估计初始曝光位置处 $l_0 = 15 \mu\text{m}$ 。

$$l = \frac{2(\Delta_{ij})^2}{\lambda(v_j - v_i)^2}, \quad (9)$$

式中, Δ_{ij} 表示第 i 级条纹与第 j 级条纹的间距, v_i 、 v_j 表示菲涅尔直边衍射中亮纹峰值对应的无量纲位置, 可由式(8)对 v 求导后解零点求得: $v_1 \approx 1.217$, $v_2 \approx 2.344$, $v_3 \approx 3.082$, $v_4 \approx 3.674$ 。

将实验参数: $\omega = 50 \mu\text{m}$, $g = 120 \mu\text{m}$ 代入式(7), 得到理想曝光位置处 $l_i = 92 \mu\text{m}$ 。据此调节光刻胶平面的位移量为 $+77 \mu\text{m}$ (远离对称双镜方向)。曝光显影后残胶分布如图 11(a) 所示, 该结果与 $l = 104.8 \mu\text{m}$ 时的程序仿真光强分布(图 11(b) 所示)较为吻合^[21]。

这说明样品曝光位置处 $l = 104.8 \mu\text{m}$, 而未在理想位置处完成曝光。原因推测为拆除旧样品推算出 l_0 后, 固定新样品曝光时, 样品与载台的贴合程度发生改变。多次实验结果显示由此引发的数值变化不超过 $20 \mu\text{m}$, 因而待测样品始终处于干涉焦深内, 不影响最终曝光结果。

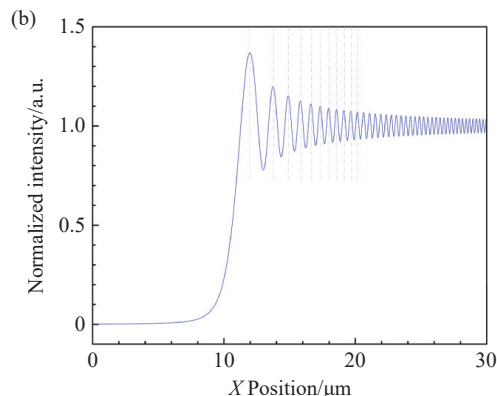
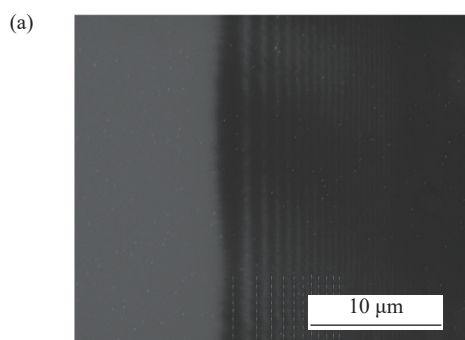


图 11 (a) 调节距离后, 对称双镜装置 ($\theta = 10^\circ$) 中, 镜面边缘引发的衍射条纹; (b) $l = 104.8 \mu\text{m}$ 时, 所获得菲涅耳直边衍射条纹的仿真结果

Fig. 11 (a) Diffraction fringes induced by the mirror edge in the symmetric dual-mirror setup ($\theta = 10^\circ$) after distance adjustment; (b) simulated Fresnel straight-edge diffraction fringes at $l = 104.8 \mu\text{m}$

5 结 论

针对低成本、高效率测试 EUV 光刻胶分辨率的需求, 研究了基于 HHG 源和反射式干涉仪的 IL 技术。实验结果表明, 气体 HHG 所获得的 EUV 源 ($\lambda = 46.8 \text{ nm}$), 在 80° 入射角条件下, 通过劳埃镜可制备 125 nm 周期的高对比度线栅结构。为解决劳埃镜中阻碍高对比度密集线栅产生的反射损失问题, 本文采用了对称双镜平衡干涉臂光强。利用衍射条纹间距反演方法完成装置的精确定位, 80° 入射角条件下, 实现周期 60 nm 的分辨率。线栅对比度不足归因于目标谐波强度分布不均的影响。

桌面级 HHG-IL 系统有助于缩短 EUV 光刻材料评估周期, 促进光刻胶研发过程中的实时反馈。未来, 若采用 HHG 技术获取到空间强度分布均匀的 13.5 nm 光源, 70° 入射角条件下, 对称双镜有望将光刻分辨率推进至 10 nm 周期。

参考文献:

- [1] BASU P, VERMA J, ABHINAV V, *et al.*. Advancements in lithography techniques and emerging molecular strategies for nanostructure fabrication [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2025, 26(7): 3027.
- [2] RAYLEIGH N. XXXI. Investigations in optics, with special reference to the spectroscope [J]. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1879, 8(49): 261-274.
- [3] CAO H B, YUEH W, ROBERTS J, *et al.*. EUV resist patterning performance from the Intel microexposure tool (MET) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5753: 459-466.

- [4] BROSE S, DANYLYUK S, TEMPELER J, *et al.*. Enabling laboratory EUV research with a compact exposure tool[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9776: 97760R.
- [5] BUITRAGO E, YILDIRIM O, VERSPAGET C, *et al.*. Evaluation of EUV resist performance using interference lithography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9422: 94221S.
- [6] 韦亚一. 超大规模集成电路先进光刻理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
WEI Y Y. *Theory and Application of Advanced Lithography for Large Scale Integrated Circuits*[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese) (查阅网上资料, 未找到本条文献英文信息, 请确认).
- [7] GRONHEID R, SOLAK H H, EKINCI Y, *et al.*. Characterization of extreme ultraviolet resists with interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4-9): 1103-1106.
- [8] EKINCI Y, SOLAK H H, PADESTE C, *et al.*. 20 nm Line/space patterns in HSQ fabricated by EUV interference lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2007, 84(5-8): 700-704.
- [9] ISOYAN A, CHENG Y C, JIANG F, *et al.*. Progress in extreme ultraviolet interferometric lithography at the University of Wisconsin[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6921: 69212R.
- [10] 赵俊, 杨树敏, 薛超凡, 等. 上海光源极紫外光刻胶检测平台[J]. *应用化学*, 2021, 38(9): 1168-1174.
ZHAO J, YANG SH M, XUE CH F, *et al.*. Extreme ultraviolet photoresist inspection platform in Shanghai synchrotron radiation facility[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2021, 38(9): 1168-1174. (in Chinese).
- [11] GIANOPOULOS I, MOCHI I, VOCKENHUBER M, *et al.*. Extreme ultraviolet lithography reaches 5 nm resolution[J]. *Nanoscale*, 2024, 16(33): 15533-15543.
- [12] 李逵, 孟润宇, 李睿暄, 等. 基于高次谐波的高功率高稳定 13.5 nm 极紫外光源[J]. *中国激光*, 2024, 51(7): 0701011.
LI K, MENG R Y, LI R X, *et al.*. High power and high stability 13.5 nm extreme ultraviolet light source driven by high-order harmonics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(7): 0701011. (in Chinese).
- [13] 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.
- [14] KIM H S, BAKSH P, ODSTRCIL M, *et al.*. Lloyd's mirror interference lithography with EUV radiation from a high-harmonic source[J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(7): 076701.
- [15] DORNEY K, CASTELLANOS S, LARSEN E, *et al.*. Lloyd's mirror interference lithography below a 22-nm pitch with an accessible, tabletop, 13.5 nm high-harmonic EUV source[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11610: 1161011.
- [16] YAMAMOTO H, DINH T H, KOZAWA T, *et al.*. Evaluation of inorganic-organic hybrid resist materials with ultrafast coherent high harmonic generation (HHG) EUV system developed in QST[J]. *Journal of Photopolymer Science and Technology*, 2025, 38(3): 217-221.
- [17] FLORES E, MOHANTY S, MITCHELL R, *et al.*. Photoresist characterization using a tabletop extreme ultraviolet source at 30 nm wavelength[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2025, 43(6): 064003.
- [18] CORKUM P B. Plasma perspective on strong field multiphoton ionization[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71(13): 1994-1997.
- [19] AN H W, CHEN J P, ZENG Y, *et al.*. Increasing the sensitivity of nonchemically amplified resists by oxime sulfonate-functionalized polystyrene[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(9): 5374-5384.
- [20] WERNER W S M, GLANTSCHNIG K, AMBROSCH-DRAXL C. Optical constants and inelastic electron-scattering data for 17 elemental metals[J]. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2009, 38(4): 1013-1092.
- [21] 王莉, 杨会静, 段芳芳. 用 MATLAB 模拟菲涅耳直边衍射[J]. *唐山师范学院学报*, 2008, 30(5): 131-132.
WANG L, YANG H J, DUAN F F. The simulation of Fresnel straight edge diffraction by MATLAB[J]. *Journal of Tangshan Teachers College*, 2008, 30(5): 131-132. (in Chinese).

作者简介:



李捷(1989—),男,浙江杭州人,博士,研究员,博士生导师,2018年于美国中佛罗里达大学获得博士学位,主要从事超快飞秒激光与高次谐波技术的研究。E-mail: lijie430@aircas.ac.cn



杨国强(1963—),男,安徽阜阳人,博士,教授,博士生导师,1991年于中国科学院感光化学研究所获得博士学位,主要从事有机光功能化合物的设计、合成、性能及其作用机理等方面的研究。E-mail: gqyang@iccas.ac.cn



樊仲维 (1965—) 男, 吉林桦甸人, 博士, 教授, 博士生导师, 1997 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事短脉冲激光峰值功率提升、光束质量控制和系统集成关键技术研究。E-mail: fanzhongwei@aircas.ac.cn