

菲涅尔衍射光刻*

蒋忠君 何伟 陈经纬 罗丹洋 杨帆 蒋凯 王亮†

(中国科学技术大学物理学院光学与光学工程系, 合肥 230026)

(2022年7月28日收到; 2022年9月11日收到修改稿)

通过合理选取等间距采样点的数目, 利用快速傅里叶变换算法解释了有限通光光阑产生的“内密外疏”菲涅尔衍射条纹. 基于菲涅尔衍射, 在静态曝光、动态扫描条件下分别实现了约 190 nm 最小特征尺寸图形制备, 以及约 350 nm 线宽线条直写. 菲涅尔衍射光刻无需复杂的光学透镜组合, 无需任何微纳衍射光学元件, 且具有较大的聚焦容差. 该方法有望成为一种新型的, 低成本、高灵活度的亚波长图形制备手段.

关键词: 菲涅尔衍射, 扩束系统, 纳米光刻, 直写光刻**PACS:** 42.50.St, 42.25.-p, 42.82.Cr, 02.30.Nw**DOI:** 10.7498/aps.72.20221533

1 引言

光刻是现代半导体工业的基石. 发展高分辨光刻技术在微电子学、光子学等领域具有重要意义. 迄今已有多种纳米光刻方法被提出, 如激光直写光刻^[1,2]、深/极紫外光刻^[3,4]、聚焦带电粒子束(如电子^[5]、离子^[6])光刻、纳米压印光刻^[7]、分子自组装光刻^[8]、表面等离子激元光刻^[9,10]等. 其中激光直写光刻具有灵活度高、系统简单经济的优点, 在微机电系统、微流体芯片等微纳米结构制备场合具有重要应用.

在激光直写系统中, 激光扩束是一种对激光输出光斑进行放大及降低发散角的光学处理, 扩束后的激光经过物镜获得最佳聚焦效果. 实验室中常用两个正透镜构成的开普勒式扩束, 作为一种透射式激光扩束方法^[11]. 扩束系统中透镜间距为两透镜的焦距之和, 具有直观、易对准的优点. 如将针孔置于两透镜中间焦点处, 可以起到滤波作用, 进而改善激光器输出的光束质量. 然而, 由于针孔可视作衍射孔径, 经滤波后的光束一般为艾里斑分布. 因此, 扩束后的光斑并非单一的圆斑, 而是放大的

艾里斑. 部分情形下会在扩束系统后方, 加入一孔径光阑来限制扩束光斑通过, 但这会不可避免地产生菲涅尔衍射条纹. 类似的衍射条纹也出现在聚焦纤维透镜实验中^[12].

不同于具有解析形式的弗朗禾费衍射(如圆孔、矩孔等孔径造成的衍射), 菲涅尔衍射积分常通过数值方法^[13,14]求解. 本文利用基于离散变换的快速傅里叶变换算法, 通过合理选取衍射屏和观察屏的等间距采样点数, 较好地解释了孔径光阑造成的“内密外疏”菲涅尔衍射条纹. 并且, 本文从实验上证明上述情形下产生的菲涅尔衍射可用于实现约 190 nm 特征尺寸图形制备, 以及约 350 nm 线宽线条的直写. 该方法具有较大的聚焦容差, 有望应用于亚波长尺度微纳结构制备等场景, 为纳米光刻提供了一种新的思路.

2 实验部分

实验光路如图 1 所示. 单色激光从激光器(laser)发出, 依次经衰减器(attenuator)、电子快门(shutter)、格兰泰勒棱镜(Glan-Taylor prism)和开普勒

* 安徽省重点研究与开发计划(批准号: 202004A05020077)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lwang121@ustc.edu.cn

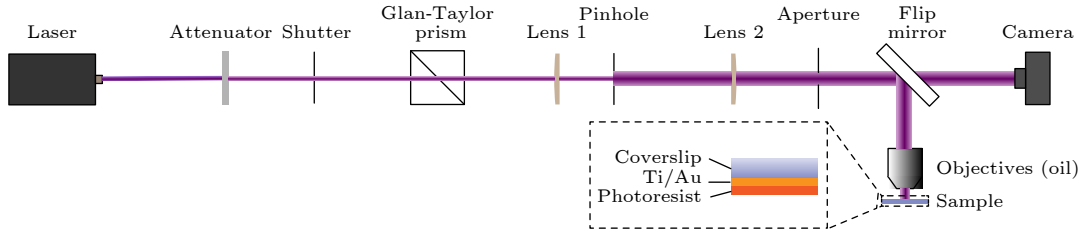


图 1 实验光路图

Fig. 1. Illustration of experimental optical set-up.

扩束系统. 扩束系统中, 透镜 1, 2 (lens 1, 2) 均为平凸透镜, 透镜焦距分别为 $f_1 = 75 \text{ mm}$, $f_2 = 225 \text{ mm}$, 针孔直径为 $25 \text{ }\mu\text{m}$. 扩束后经孔径光阑 (aperture) 到达相机 (camera), 或经翻转反射镜 (flip mirror)、物镜 (objectives) 聚焦后照射在样品 (sample) 上.

图 2 为相机 (Thorlab CS126MU) 在不同位置处捕捉的光斑照片. 图 2(a) 为实验中所用紫外连续激光器 (长春新产业 MSL-FN-360-30 mW, 中心波长: 360 nm) 出射光斑, 可以看到未经针孔滤波处理的激光光斑并非规则的圆斑. 图 2(b) 为扩束后外形规则的光斑 (呈艾里斑样), 中心亮斑直径约 8.5 mm .

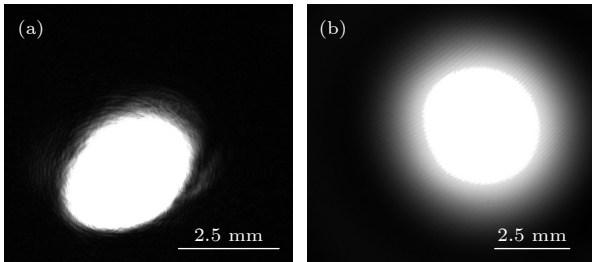


图 2 不同位置处光斑照片 (a) 激光器出射光斑, 呈非规则形; (b) 滤波扩束后光斑, 呈艾里斑状

Fig. 2. Optical spots at different positions: (a) Laser spot; (b) the expanded and filtered optical beam.

实验样品准备方面, 首先将 $22 \text{ mm} \times 22 \text{ mm} \times 0.17 \text{ mm}$ 的盖玻片 (coverslip) 清洗干净, 然后通过电子束蒸发在玻片表面沉积 $5 \text{ nm}/50 \text{ nm}$ 钛 (Ti)/金 (Au) 薄膜 (Kurt J. Lesker LAB 18, 沉积速率 $1 \text{ }\text{\AA}/\text{s}$. 其中: 钛的作用为黏附层, 金的作用为提高玻璃片上光刻图案在光学显微镜下的衬度). 接着以 4000 rpm 的转速在样品表面旋涂一层稀释后的正性光刻胶 (Shipley S1805 Photoresist, 稀释比例 Photoresist: PGMEA = 1:6. 其中 PGMEA: 丙二醇甲醚醋酸酯, 正胶稀释剂. 试剂采购于苏州研材微纳科技有

限公司), 旋涂时间为 40 s . 旋涂后的样品置于 $115 \text{ }^\circ\text{C}$ 热板上烘烤 90 s , 椭偏仪 (SOPRA GES5E) 测得光刻胶厚度约 50 nm . 实验中为避免镜油与光刻胶直接接触, 样品翻转后置于油镜 (Olympus UPlanFL N, 数值孔径 Numerical Aperture, $NA = 1.3$, 入瞳直径 4.7 mm) 下方, 如图 1 所示.

3 结果与讨论

3.1 菲涅尔衍射

当在扩束系统后方加入孔径光阑限制光束通过时, 会在光阑后方一定距离内观察到明纹和暗纹宽度由中心向四周逐渐变大 (之后简称该规律为“内密外疏”) 的同心圆环衍射图案, 如图 3(a) 所示 (拍摄于 8 mm 通光光阑后方 8 cm 处). 这实际上是孔径光阑作为衍射孔径产生的菲涅尔衍射图形. 一般地, 光阑坐标平面 (ξ, η) 的透过率函数 $t(\xi, \eta)$ 可写为

$$t(\xi, \eta) = \begin{cases} 1, & \xi^2 + \eta^2 < (d/2)^2, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (1)$$

其中 d 为光阑的通光直径. 此处假设光阑被扩束后的光场 (波长 λ) 均匀照明 (虽然是较强的近似, 但后面会看到理论与实际仍相当吻合), 根据菲涅尔衍射计算公式^[15], 距离光阑右方 z 位置处观察平面 (x, y) 上的复场 U 为

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} t(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]} d\xi d\eta, \quad (2)$$

其中 e 为自然对数的底数符号; $k = 2\pi/\lambda$ 为自由空间中波数. 该积分公式也可以改写成:

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \iint_{-\infty}^{\infty} [t(\xi, \eta) e^{i\frac{k}{2z}(\xi^2+\eta^2)}] \times e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x\xi+y\eta)} d\xi d\eta. \quad (3)$$

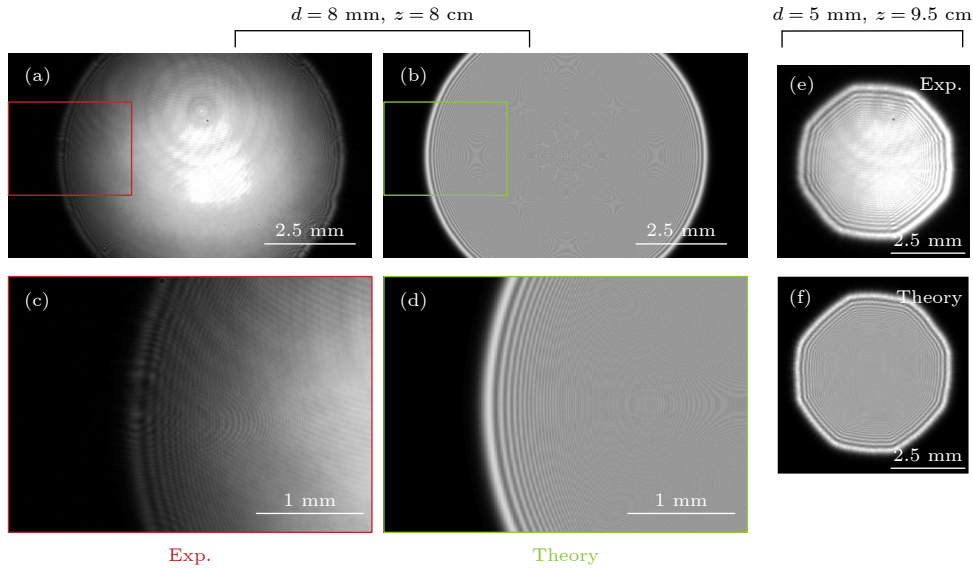


图3 光阑后方菲涅尔衍射图案 (a), (b) 距离 8 mm 孔径光阑 8 cm 处的衍射图案照片 (a) 及理论计算 (b); (c), (d) 分别为图 (a) 和图 (b) 的局部细节; (e), (f) 距离 5 mm 孔径光阑 9.5 cm 处的衍射图案照片 (e) 及理论计算 (f)

Fig. 3. Fresnel diffraction patterns behind the aperture: (a) The captured and (b) calculated images at 8 cm away from an 8-mm-diameter aperture. Zoomed-in images of Figure (a) and Figure (b) are respectively shown in Figure (c) and Figure (d). Optical spots at different positions. Also shown are the captured (e) and calculated (f) images at 9.5 cm away from a 5-mm-diameter aperture.

即复振幅 U 为光阑透过率函数与一个二次相位因子乘积的傅里叶变换 (当仅关心观察面的相对强度分布时, 积分符号前面的项可以忽略). 利用科学计算软件矩阵实验室 (MATLAB) 中的快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 算法可以容易求得距离孔径光阑任意位置处 (当然, 需要满足菲涅尔近似条件) 的复振幅分布, 进而得到衍射图样的强度分布. 需要注意的是, MATLAB 中 FFT 算法基于离散傅里叶变换, 因此计算中合理的采样点数十分重要^[13,16], 否则会得到与实验相悖的结果. 满足采样定理条件下^[16], 衍射屏以及观察屏平面的取样数 N 按如下方式选取:

$$N = \begin{cases} \text{Round} \left[\frac{D^2}{\lambda z} \right], & \text{Round} \left[\frac{D^2}{\lambda z} \right] \text{ 为奇数,} \\ \text{Round} \left[\frac{D^2}{\lambda z} \right] + 1, & \text{Round} \left[\frac{D^2}{\lambda z} \right] \text{ 为偶数,} \end{cases} \quad (4)$$

其中 D 为衍射屏计算区域宽度 (取正方形计算区域, 计算中 $D^2 = (1.5d)^2$), $\text{Round}[\]$ 为取整符号.

图 3(b) 为 MATLAB 计算得到的 $d = 8 \text{ mm}$, $z = 8 \text{ cm}$ 条件下的菲涅尔衍射图案, 可见理论和实验符合得相当好. 图 3(c) 与图 3(d) 分别为图 3(a) 与图 3(b) 的局部细节放大图片. 此外, 图 3(e) 与图 3(f) 还分别给出了 $d = 5 \text{ mm}$, $z = 9.5 \text{ cm}$ 条件

下菲涅尔衍射图案照片和理论计算的对比, 同样吻合较好. 由于实验所用光阑 (上海联谊光纤激光器械有限公司, OI-8) 由八片扇叶构成, 当通光孔径缩小时, 衍射图案的正八边形轮廓愈加明显.

3.2 菲涅尔衍射光刻

一般情况下, 在成像等应用中衍射条纹现象应尽可能避免. 但笔者在实验中发现, 油镜聚焦后的菲涅尔衍射也可作为一种纳米光刻手段 (如图 4 所示), 实现亚波长结构图形的经济高效制备. 光刻过程为: 将图 4(a) 和图 4(b) 所示的菲涅尔衍射图案作为油镜的输入光场 (计算于直径 6 mm 光阑 (大恒光电 GCT-570101) 后方 20 cm 处), 经油镜粗略聚焦后投射至光刻胶中 (图 4(c)). 实验中通过二维手动位移台 (translation stage, 大恒光电 GCM-T25M2L) 调整油镜垂直方向位置完成对焦的粗调, 油镜与样品间距 g 由位移台上千分尺读数给出. 样品通过载片台 (sample holder) 固定在精密二维电动位移台 (xy -stage, 无锡地心科技 ART130XY) 上以实现样品水平位置的调整.

图 5 展示了曝光功率 $1.06 \mu\text{W}/\text{mm}^2$ (光功率计 Thorlab S120 VC), 曝光 1.5 s, 显影 30 s 的菲涅尔衍射静态光刻图形. 其中图 5(a)—(d) 和图 5(e)—(h) 分别为油镜与样品间距 g , $g = 0.2 \text{ mm}$ 时的静态光刻图形, 两种条件下光刻结果均呈现微缩的

“内密外疏”菲涅尔衍射图形. 对比图 5(b) 和图 5(c) 与图 4(b) 可以发现光刻与衍射图形的相似性, 说

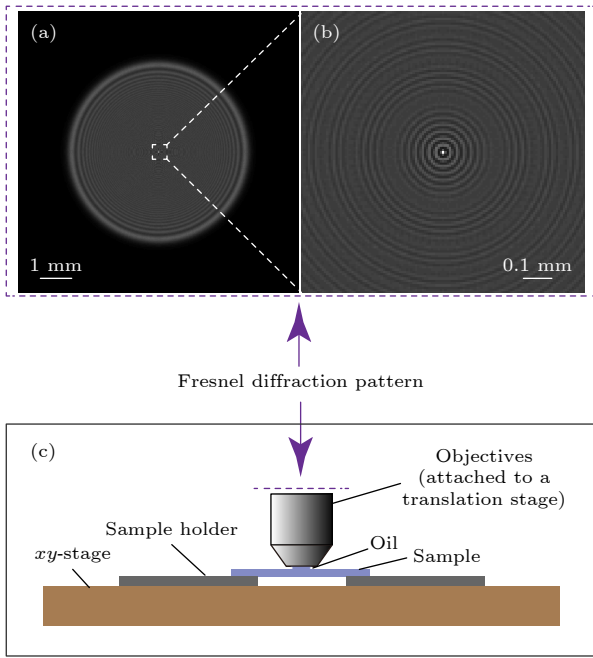


图 4 菲涅尔衍射光刻示意图 (a), (b) 计算得到的直径 6 mm 光阑后方 20 cm 处菲涅尔衍射图案 (a) 及其中心附近放大细节 (b); (c) 菲涅尔衍射光刻实验示意图

Fig. 4. Set-up for Fresnel diffraction lithography: (a), (b) The simulated Fresnel diffraction pattern (a) at a distance of 20 cm behind a 6 mm-aperture and its zoomed-in image near the center (b); (c) depiction of the lithography apparatus.

明光刻图形确由菲涅尔衍射引起. 从图 5(a) 和 5(e) 所示的光学显微镜 (optical microscope, OM, Leica DM8000M) 照片可以发现, 当油镜逐渐靠近样品时静态图形变小, 这对应油镜逐渐近焦的状态. 图 5(b) 和图 5(c) 分别为图 5(a) 图形中心及附近的紫外光学显微镜 (ultra-violet optical microscope, UV-OM, Leica DM8000M) 照片和原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM, Bruker Dimension Icon) 图像, 衍射条纹清晰可见, 线条与线条之间的中心距离 (节距, pitch) 约在波长量级. 图 5(d) 绘出了图 5(c) 中蓝色实线位置处的表面形貌, pitch 大小为 391 nm, 半节距 (half pitch, HP) 则为 196 nm. 类似地, 图 5(g) 中绿色实线位置处的 pitch 为 372 nm, 半节距为 186 nm, 已经接近衍射极限 $0.61\lambda/NA = 169$ nm. 值得注意的是, 以上实验结果均是在油镜未准确对焦的情况下获得的. 静态光刻图形中心附近出现的其他条纹可能由实验中的震动、物镜的沾污引起.

图 6 展示了不同油镜-样品间距时, 100 和 200 $\mu\text{m}/\text{s}$ 扫描速度, 显影时间 30 s 条件下的菲涅尔衍射扫描光刻线条. 对比图 6(a)—(h) 可以发现当扫描速度加快时, 线条线宽趋于变小, 但对比度变低. 图 6(i) 和图 6(j) 分别为 $g, g - 0.2$ mm 油镜-样品间距, 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 扫描速度下所得线条的 AFM

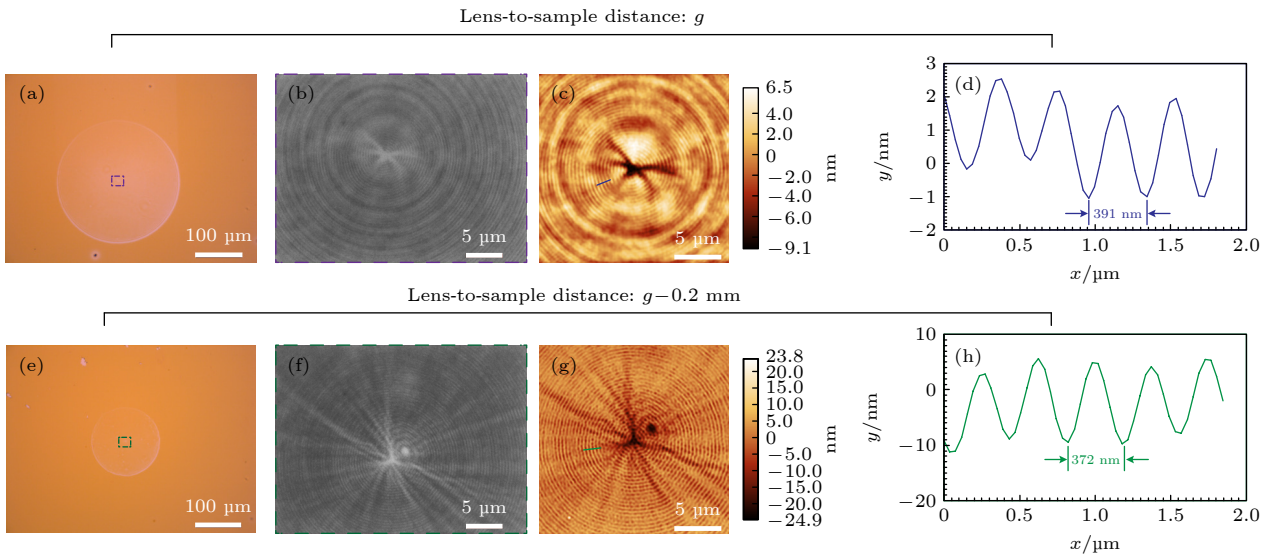


图 5 菲涅尔衍射静态光刻 (a)—(d) 油镜与样品间距 g 时的静态光刻图形 OM 照片 (a), UV-OM 照片 (b), AFM 图像 (c) 及表面形貌 (d); (e)—(h) 油镜与样品间距 $g - 0.2$ mm 时的静态光刻图形 OM 照片 (e), UV-OM 照片 (f), AFM 图像 (g) 及表面形貌 (h) Fig. 5. Fresnel diffraction lithography results: (a)—(d) The captured OM (a)/(e), UV-OM (b)/(f) and AFM (c)/(g) images obtained when the lens-sample distance is $g/g - 0.2$ mm. Also shown are the line profiles (d), (h) at positions indicated by blue and green solid lines in Figure (c) and Figure (g), respectively.

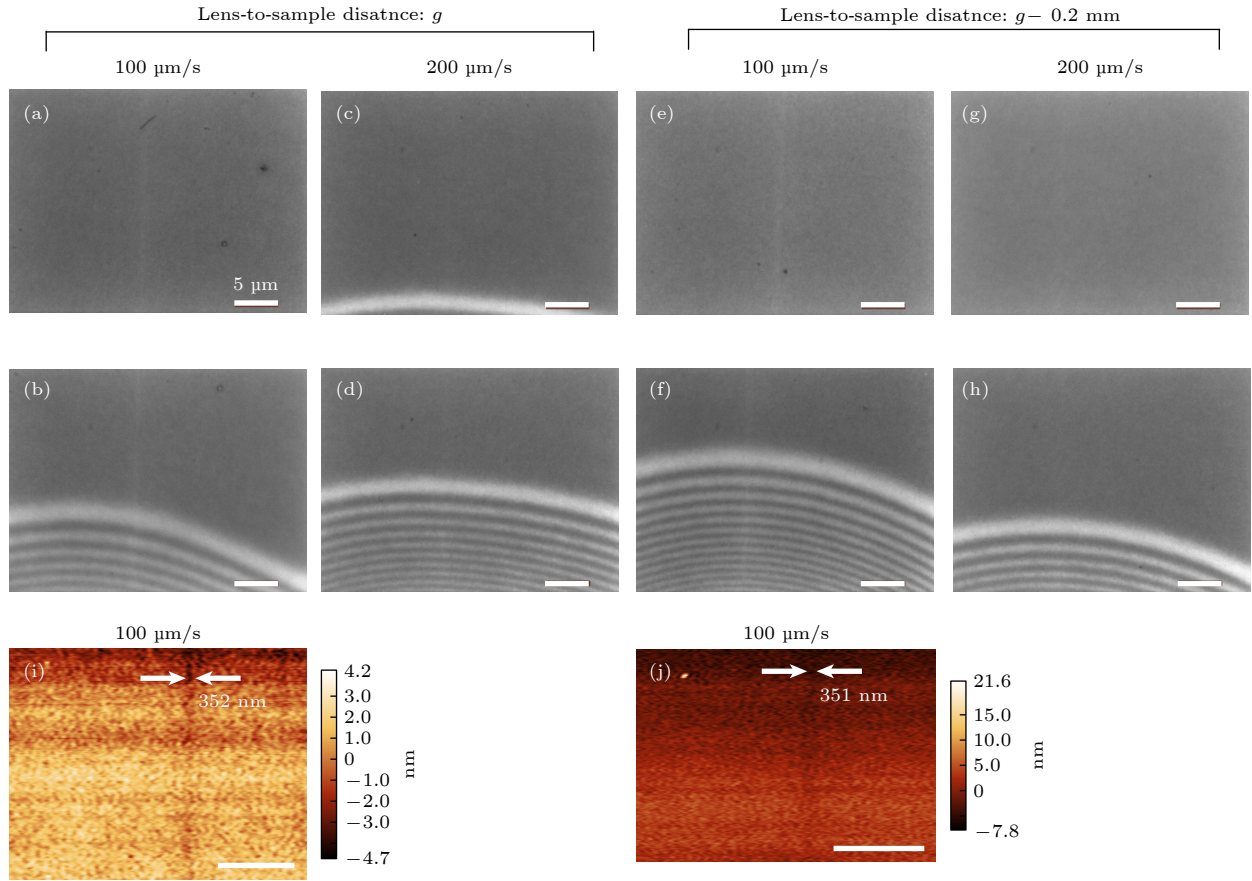


图 6 菲涅尔衍射扫描光刻 (a)–(d) 油镜与样品间距 g 时扫描速度 $100 \mu\text{m/s}$ ((a), (b)), $200 \mu\text{m/s}$ ((c), (d)) 的动态光刻图形 UV-OM 照片; (e)–(h) 油镜与样品间距 $g - 0.2 \text{ mm}$ 时扫描速度为 100 ((e), (f)) 和 $200 \mu\text{m/s}$ ((g), (h)) 的动态光刻图形 UV-OM 照片; (i), (j) 油镜与样品间距 g , $g - 0.2 \text{ mm}$ 时扫描速度 $100 \mu\text{m/s}$ 所得图形的 AFM 图像. 比例尺均为 $5 \mu\text{m}$

Fig. 6. Fresnel diffraction scanning lithography: (a)–(h) With the scanning speed of 100 and 200 $\mu\text{m/s}$, the captured UV-OM ((a)–(d), (e)–(h)) images obtained when the lens-sample distance is g and $g - 0.2 \text{ mm}$, respectively. Also shown are the AFM images (i), (j) with a scanning speed of 100 $\mu\text{m/s}$ at g and $g - 0.2 \text{ mm}$, respectively. Scale bars: $5 \mu\text{m}$.

图像. 有趣的是, 尽管对应不同的对焦状态, 两种条件下扫描线条线宽十分接近, 约为 350 nm .

在高 NA 光学系统中, 光场的矢量性质必须考虑^[17–20]. 例如线偏振光入射时, 高 NA 物镜焦平面的强度场分布并非如标量衍射理论预测具有旋转对称性, 而呈椭圆形, 即所谓的去偏振 (depolarization) 效应. 为解释本文中的菲涅尔衍射光刻实验现象, 需要借助矢量衍射理论进行分析. 油镜焦平面处观察点 P 的矢量光场分布 $\mathbf{E}(P)$ 可通过德拜-沃尔夫矢量积分^[21] 表达为

$$\mathbf{E}(P) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{\Omega} \mathbf{E}(P_0) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}} d\Omega, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{E}(P_0)$ 为油镜出射光瞳上聚焦球面波前任意一点 P_0 的矢量光场分布; \mathbf{s} 为 P_0 产生的平面次级子波传播方向单位矢量; \mathbf{R} 为焦平面观察点 P 的位置矢量; Ω 为出瞳口径与点 P 所张立体角. Hu 等^[22]

指出 (5) 式中的矢量积分公式可写成傅里叶变换形式:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(P) &= \frac{1}{i\lambda} \mathcal{F} \left[\mathbf{E}(P_0) \cdot \frac{1}{\cos\theta} \right] \\ &= \frac{1}{i\lambda} \mathcal{F} \left[\sqrt{\cos\theta} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} \cdot \frac{1}{\cos\theta} \right] \\ &= \frac{1}{i\lambda} \mathcal{F} \left[\mathbf{M} \cdot \mathbf{E}_{\text{in}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\cos\theta}} \right], \end{aligned} \quad (6)$$

其中 \mathcal{F} 为傅里叶变换符号; θ 为 P_0 与光轴所夹极角; \mathbf{M} 为坐标变换矩阵^[23]; \mathbf{E}_{in} 为油镜入瞳面光场 (计算中认为油镜满足正弦条件). 利用 Bluestein^[24,25] 方法可以快速求得菲涅尔衍射光场 (图 4(a) 和图 4(b)) 经油镜聚焦后在焦平面的光场分布, 如图 7 所示. 从图 7(a)–(c) 可以看出, 焦平面光斑呈椭圆状, 其半高全宽分别为 230 nm (x 方向), 201 nm (y 方向) (实验中入射光源偏振方向、光刻

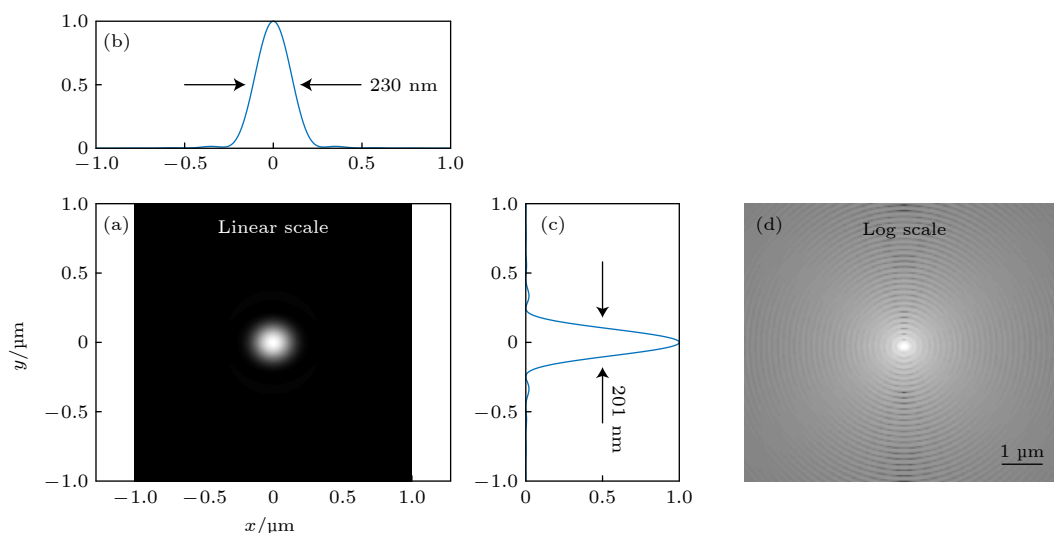


图 7 矢量衍射理论计算得到的油镜焦点处光场分布 (a) 及其在 x, y 方向上的半高全宽信息 ((b), (c)); (d) 对数尺度上焦平面光场分布

Fig. 7. Calculated light field distribution on the focal plane of oil immersion objectives (a) along with the full width at half maximum in x (b) and y -direction (c) using vectorial diffraction theory. (d) Focused light distribution plotted on a log scale.

扫描方向均沿 x 方向). 对数尺度上绘出焦平面场分布时, 圆环特征明显 (图 7(d)) 并与图 5(f) 和图 5(g) 相似, 环-环中心间距约为 140 nm. 根据以上计算笔者推测: 1) 静态光刻时, 因有足够的感光剂量光刻胶中可得到同心圆环结构; 2) 扫描光刻时, 曝光剂量仅能使图形中心处的光刻胶感光, 后经扫描得到线条结构. 由于实验中油镜并非处于理想聚焦状态, 因此光刻结构/线条的尺寸相比理论值偏大. 随着逐渐正确对焦, 特征尺寸逐渐趋近于理论值, 这也与图 5 中静态光刻结果显示的趋势相符. 尽管如此, 笔者的实验结果仍然表明: 菲涅尔衍射光刻在一定聚焦误差范围内可获得亚波长尺寸图形, 体现了该方法良好的聚焦容差. 需要说明, 本文中的菲涅尔衍射式照明等效上可视作引入光瞳滤波器^[26]对光场振幅/相位调制, 虽降低了横向分辨率, 但扩展了轴向焦深, 因此一定程度上解释了该方法的聚焦容差.

以上结果和讨论表明无需复杂光学透镜组合、无需任何微纳衍射光学元件的菲涅尔衍射直写光刻, 其光刻分辨率接近甚至优于商用激光直写设备 (德国 Heidelberg Instruments DWL 66⁺) 性能. 并且, 油镜未严格对焦情形 (如油镜-样品间距: $g, g - 0.2$ mm) 下获得的静态、扫描光刻结果在关键尺寸上仍具有相似性, 表明该方法具有较大的聚焦容差. 通过进一步优化实验条件, 菲涅尔衍射光刻有望实现更小线宽、更高对比度、更复杂的亚波长

尺寸光学功能结构 (如反射型光学超构表面) 制备.

4 结 论

本文利用快速傅里叶变换算法解释了有限大小通光孔径造成的“内密外疏”菲涅尔衍射现象, 并基于此实现一种纳米光刻方法. 使用 360 nm 连续激光作为光源, 菲涅尔衍射光刻在静态曝光条件下可实现约 190 nm 最小特征尺寸的旋转对称图形制备; 动态扫描条件下可实现约 350 nm 线宽线条的直写. 该方法无需传统激光直写系统中的复杂光学透镜组合、无需任何微纳衍射光学元件, 且具有较大的聚焦容差. 笔者相信经过更完善的实验优化, 菲涅尔衍射光刻有望成为一种经济高效的新型纳米加工手段.

本工作样品制备和表征方面得到中国科学技术大学微纳研究与制造中心的帮助.

参考文献

- [1] Menon R, Patel A, Gil D, Smith H I 2005 *Mater. Today* **8** 26
- [2] Xu K, Qin J, Wang L 2021 *Opt. Lett.* **46** 5185
- [3] Sanders D P 2010 *Chem. Rev.* **110** 321
- [4] School J S, Schenau K I, Valentin C, Migura S 2015 *Proc. SPIE 9422, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI* San Jose, California, United States, March 16, 2015 p94221F
- [5] Chen Y F 2015 *Microelectron. Eng.* **135** 57
- [6] Langford R M, Nellen P M, Gierak J, Fu Y 2007 *MRS Bull.*

- 32 417
- [7] Traub M C, Longsine W, Truskett V N 2016 *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.* **7** 583
- [8] Seino Y, Yonemitsu H, Sato H, Kanno M, Kato H, Kobayashi K, Kawanishi A, Azuma T, Muramatsu M, Nagahara S, Kitano T, Toshima T 2013 *J. Micro-Nanolitho. Mem. Moems.* **12** 033011
- [9] Jiang Z, Liu Y, Liang W 2022 *Opto-Electron. Sci.* **1** 210004
- [10] Jiang Z J, Luo H W, Guo S P, Wang L 2019 *Opt. Lett.* **44** 783
- [11] Li X B, Wang C H, Qu Y, Ren X Y 2015 *Laser Optoelectron. Prog.* **52** 6 (in Chinese) [李小宝, 王春晖, 曲扬, 任逍遥 2015 激光与光电子学进展 **52** 6]
- [12] Gu M F, Liang Z C 2000 *J. Nanjing Normal Univ. (Nat. Sci.)* **23** 4 (in Chinese) [顾敏芬, 梁忠诚 2000 南京师大学报(自然科学版) **23** 4]
- [13] Kelly D P 2014 *J. Opt. Soc. Am. A*: **31** 755
- [14] Mas D, Perez J, Hernandez C, Vazquez C, Miret J J, Illueca C 2003 *Opt. Commun.* **227** 245
- [15] Goodman J W 2011 *Introduction to Fourier Optics* (3rd Ed.) (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) pp48, 49 (in Chinese) (in Chinese) [古德曼 J W 著 (秦克诚 刘培森 陈嘉璧 曹其智译) 2011 傅里叶光学导论(第3版) (北京: 电子工业出版社) 第48, 49页]
- [16] Zhang W, Zhang H, Sheppard C J R, Jin G 2020 *J. Opt. Soc. Am. A* **37** 1748
- [17] Lee K G, Kihm H W, Kihm J E, Choi W J, Kim H, Ropers C, Park D J, Yoon Y C, Choi S B, Woo D H, Kim J, Lee B, Park Q H, Lienau C, Kim D S 2006 *Nat. Photonics* **1** 53
- [18] Liu T, Tan J, Liu J, Wang H 2013 *Opt. Express* **21** 15090
- [19] Kim J, Wang Y, Zhang X 2018 *J. Opt. Soc. Am. A* **35** 526
- [20] Liu K, He T, Liu T, Li G Q, Tian B, Wang J Y, Yang S M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184215 (in Chinese) [刘康, 何韬, 刘涛, 李国卿, 田博, 王佳怡, 杨树明 2020 物理学报 **69** 184215]
- [21] Wolf E 1959 *Proc. R. Soc. London, Ser. A* **253** 349
- [22] Hu Y, Wang Z, Wang X, Ji S, Zhang C, Li J, Zhu W, Wu D, Chu J 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 119
- [23] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (7th Ed.) (Cambridge: Cambridge University Press)
- [24] Bluestein L 1970 *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* **18** 451
- [25] Rabiner L, Schafer R, Rader C 1969 *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* **17** 86
- [26] Liu T 2014 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) (in Chinese) [刘涛 2014 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]

Fresnel diffraction lithography*

Jiang Zhong-Jun He Wei Chen Jing-Wei Luo Dan-Yang

Yang Fan Jiang Kai Wang Liang[†]

(*Department of Optics and Optical Engineering, School of Physics Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 28 July 2022; revised manuscript received 11 September 2022)

Abstract

Lithography plays a vital important role in modern information technologies. Patterning on a nanoscale in a handy way is highly desired for both scientific and industrial purposes. In this work, we propose a convenient nanolithography method based on Fresnel diffraction patterns. We start with the explanation of the “dense-inside-sparse-outside” Fresnel diffraction fringes resulting from the apertures of finite extent, by using the fast Fourier transform algorithm through appropriately choosing the number of uniformly spaced samples. Moderately focusing the diffraction patterns via high-numerical-aperture objectives (the method is termed the “Fresnel diffraction lithography”), the rotationally symmetric patterns with a minimum feature size of ~190 nm, and the scanning lines with a width of ~350 nm are realized, respectively, The calculation using vectorial diffraction theory suggests a better resolution when perfectly focused. This method shows good tolerance to defocus and does not require complex lens combinations or micro/nano-diffraction optical elements, Therefore, this method can find some applications in widespread areas, e.g. functional metasurfaces, as a novel and low-cost nano-patterning technology with sub-wavelength resolution and high flexibility.

Keywords: Fresnel diffraction, beam expander, nanolithography, direct writing lithography

PACS: 42.50.St, 42.25.-p, 42.82.Cr, 02.30.Nw

DOI: [10.7498/aps.72.20221533](https://doi.org/10.7498/aps.72.20221533)

* Project supported by the Key R&D Program of Anhui Province (Grant No. 202004A05020077).

† Corresponding author. E-mail: lwang121@ustc.edu.cn



菲涅尔衍射光刻

蒋忠君 何伟 陈经纬 罗丹洋 杨帆 蒋凯 王亮

Fresnel diffraction lithography

Jiang Zhong-Jun He Wei Chen Jing-Wei Luo Dan-Yang Yang Fan Jiang Kai Wang Liang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 014202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221533

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221533>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

菲涅耳非相干数字全息大视场研究

Fresnel incoherent digital holography with large field-of-view

物理学报. 2019, 68(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182216>

图像传感器像素化效应对菲涅耳非相干关联全息分辨率的影响

Influence of pixelation effect of image sensor on resolution of Fresnel incoherent correlation holography

物理学报. 2019, 68(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181844>

入射光照对典型光刻胶纳米结构的光学散射测量影响分析

Influence of incident illumination on optical scattering measurement of typical photoresist nanostructure

物理学报. 2020, 69(3): 030601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191525>

晶体X射线劳厄衍射分束特性研究

Beam splitting characteristics of crystal X-ray Laue diffraction

物理学报. 2022, 71(4): 046101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211674>

无衍射光束的产生及其应用

Generation and applications of non-diffraction beam

物理学报. 2018, 67(21): 214204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181227>

采用衍射掩模产生白光横向平顶光束

Horizontal white light flat-topped beams produced by the diffraction mask

物理学报. 2018, 67(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180030>