

基于傅里叶合成技术的光刻照明系统研究

李慧, 吴晓斌*, 韩晓泉, 马赫, 沙鹏飞

中国科学院微电子研究所光电技术研发中心, 北京 100029

摘要 离轴照明技术是光刻工艺中提高成像分辨率的关键技术之一。本文提出了一种基于傅里叶合成技术的照明系统,该系统能够实现任意照明模式,并可以提高成像数值孔径,同时具有灵活高效、能量利用率高、易于实现等优点。本课题组通过计算仿真和搭建的实验装置验证了傅里叶合成技术实现任意照明模式的可行性,掌握了傅里叶照明系统所需的数值孔径合成方法,实现照明所需的发散度。基于优化的照明程序版图在实验中实现了圆盘、二级、四极、环形等照明模式,这些照明模式光强分布较均匀且照明形状无畸变。当 MEMS 二维振镜的扫描角度为 $\pm 1^\circ$ 且选用收集镜成像倍率为 10 时,在收集镜上可以实现最大扫描照明尺寸超过 30 mm,焦点面上的 $4 \times NA$ 值超过 0.6,这一结果可以匹配当前及下一代光刻工艺及掩模检测应用的照明需求。

关键词 傅里叶光学; 傅里叶合成; 光刻工艺; 离轴照明; 椭球收集镜; 角度扫描

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221221

1 引言

离轴照明技术是光刻工艺中一种重要的分辨力增强技术,能够有效提高光刻系统的分辨率和焦深。与部分相干因子的调控相结合,该技术能够使光刻系统对不同的曝光线宽实现最佳分辨率^[1-2]。

传统离轴照明技术的实现方式包括采用光瞳滤波器、折射元件及衍射元件等。其中:光瞳滤波器易实现离轴照明,但能量损失严重^[3];以轴锥镜为代表的折射元件的制作和装调比较容易,但难以实现少数特殊的照明模式^[4-5];衍射元件可实现各种照明模式,但单个衍射元件仅对应一种照明模式^[4]。此外,在极紫外(EUV)波段,光学材料对 EUV 辐射的强吸收^[6]导致折射元件和透射式衍射光学元件基本无法应用于该波段。在反射元件的应用方面,由数千个微反射镜组成的微反射镜阵列可以灵活实现自由光瞳照明模式,但数千个微反射镜的装调、二维精确控制等具有一定难度^[7-8]。

傅里叶合成照明技术是一种可以高效实现任意照明模式的技术手段^[9-11]。通过编程设计、控制光束的角度和扫描轨迹,不仅可以实现包括在轴及各种离轴照明模式的任何形状的照明光源,有效增加合成光源的尺寸,增大合成照明的数值孔径,还可以对照明相干因子 σ 进行调节,从而提高成像分辨率^[9-11]。

此外,傅里叶合成照明技术的优点还体现在激光相干控制方面^[11-12]。傅里叶合成技术通过对光束进行

高频角度扫描,可以产生所需的照明空间频谱。各频谱分量之间存在的时间差异和角度多样性,可以有效降低高相干光发生干涉效应的可能性^[10,12],减小干涉斑纹对成像对比度的不利影响^[13-14]。

因此,傅里叶合成照明技术能在光刻照明系统中发挥重要作用,是目前国际上 EUV 领域主流科研机构采用的技术手段^[9-12],但国内还没有傅里叶合成照明的公开报道。同步辐射或自由电子激光等 EUV 光源具有相干性高、发散度小的特点^[8,11-12,15],通过傅里叶合成照明技术可使其满足照明系统的使用要求。

本文针对傅里叶合成照明技术进行了研究。傅里叶合成照明技术基于二维扫描振镜(MEMS 反射镜,一种微机电系统)的高频扫描特性^[16],在优化的程序扫描版图支持下,能够实现任意照明模式选择和相干可控的均匀照明,从而可以在掩模缺陷检测、光刻投影曝光等应用领域发挥重要作用。

2 傅里叶合成照明技术分析和结构设计

2.1 相干性控制分析

Van Cittert-Zernike 定理证明了照明平面空间带宽和空间相干性之间存在等效傅里叶变换关系。为了控制空间相干性,需要控制空间带宽^[12]。电磁场是一个具有振幅和相位的复变函数。部分相干光场的二维复振幅函数 $U(x, t)$ 可以写成傅里叶变换的形式

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-09-29; 录用日期: 2022-10-19; 网络首发日期: 2022-10-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(6207012724)

通信作者: *wuxiaobin@ime.ac.cn

$$U(x, t) = \int U(x, \omega) \exp(-j\omega t) d\omega, \quad (1)$$

式中: $U(x, t)$ 是给定位置 x 和时间 t 的标量场; $U(x, \omega)$ 是频率为 ω 的确定性单色光场的标量复振幅(不含时间); $\exp(-j\omega t)$ 是与时间相关的快速波动部分。光束时空相干性可由四维关联函数进行表征。互相干函数定义为一个相对时延 τ 关于空间 x_1 和 x_2 两点光振动的相关函数, 即

$$\Gamma(x_1, x_2, \tau) = \langle U(x_1, t_1) U^*(x_2, t_2) \rangle = \langle U(x_1, t) U^*(x_2, t + \tau) \rangle, \quad (2)$$

式中: $\tau = t_2 - t_1$ 。因此, 相同波长平面波的空间相干度 $\gamma(x_1, x_2, \tau)$ 可由互相干函数 $\Gamma(x_1, x_2, \tau)$ 的归一化函数描述, 称为复相干度, 其表达式为

$$\gamma(x_1, x_2, \tau) = \frac{\Gamma(x_1, x_2, \tau)}{\sqrt{\Gamma(x_1, x_1, 0) \Gamma(x_2, x_2, 0)}}. \quad (3)$$

式(3)表示传输波空间性质的电场二阶相关函数, 但它对应的是场强度的一阶相关。基于互相干函数的定义, 光强可被简单地表示为 $I(x) = \Gamma(x, x, 0)$ 。因此, 复相干度 $\gamma(x_1, x_2, \tau)$ 可以表示为

$$\gamma(x_1, x_2, \tau) = \frac{\Gamma(x_1, x_2, \tau)}{\sqrt{\langle I(x_1, \tau) \rangle \cdot \langle I(x_2, \tau) \rangle}}, \quad (4)$$

式中: $\langle I(x_i, \tau) \rangle = \Gamma(x_i, x_i, 0)$, 是点 $x_i (i=1, 2)$ 处强度随时间变化的平均值。

复相干度 γ 表征了空间两点之间的相干情况。复相干度的模 $|\gamma(x_1, x_2, \tau)|$ 代表两束光波干涉叠加后形成干涉条纹的对比度, $0 \leq |\gamma(x_1, x_2, \tau)| \leq 1$ ^[17-18]。傅里叶合成技术的角度扫描过程可以在光瞳面上生成所需的空频谱, 而各空间频率分量之间均存在一定的时间差, 因此可以降低空间多位置点之间的复相干度, 从而降低像点处重合光斑的干涉效应。

2.2 傅里叶合成照明原理及椭球反射镜成像

傅里叶合成照明结构采用 MEMS 反射镜作为动态扫描元件, 利用其一维或二维高频扫描特性形成傅里叶合成照明, 同时将椭球反射镜作为收集聚光镜, 将不同角度的扫描光束聚焦成像到指定位置点。

图 1 所示为傅里叶合成照明结构示意图。将 MEMS 反射镜置于椭球反射镜的一个焦点(如 F_1)处, 光线入射点与焦点重合。当 MEMS 反射镜高频转动时, 将产生一系列不同角度的反射光, 形成扫描轨迹, 生成不同照明形状的合成光源。角 θ_1 和 θ_2 分别为物方和像方扫描光线的夹角范围。角 α 为 MEMS 镜上物方光线的入射角; 角 β 为像方主光线的入射角, 代表照明光的离轴程度。

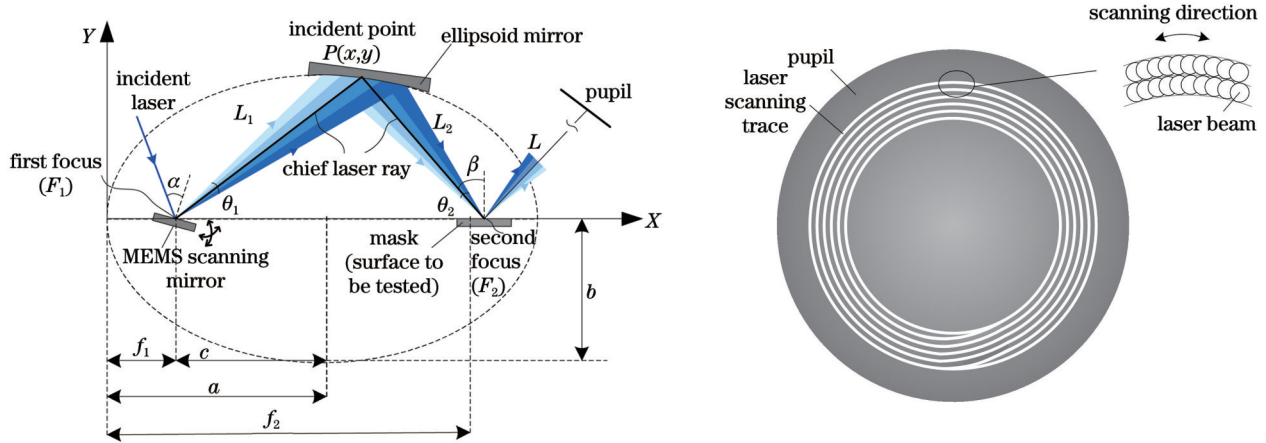


图 1 傅里叶合成照明结构示意图。(a) 椭球镜成像原理; (b) 光瞳面环形照明扫描轨迹示意

Fig.1 Schematic diagrams of Fourier-synthesis illuminator. (a) Schema of ellipsoid mirror imaging; (b) scan track of circle illumination on pupil plane

基于椭球反射镜的特性, 从椭球反射镜一个焦点发出的光线反射后都将成像到另一焦点处, 不产生球差^[19]。经椭球镜反射后, 扫描光束携带着所需的照明模式和数值孔径等特性重新会聚到位于像点处的掩模(待测表面)指定位置, 照亮掩模。随着 MEMS 镜的转动, 不论光束扫描轨迹如何变化, 照明像点位置不变。椭球反射镜除了可对扫描光束进行会聚以外, 其自身的成像倍率还能改变像点照明光斑的尺寸, 同时还能调整像方的数值孔径。随后, 携带掩模表面缺陷信息的反射光继续传输, 进入后续成像系统, 最后在 CCD 上显示出掩模表面的缺陷形貌。

对于椭球反射镜^[19-21], 可得

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ (for reflection point } P), \quad (5)$$

$$a = \frac{(f_1 + f_2)}{2}, \quad (6)$$

$$b = \sqrt{f_1 \cdot f_2}, \quad (7)$$

$$a^2 - b^2 = c^2, \quad (8)$$

$$L_1 + L_2 = 2a, \quad (9)$$

$$R = \pm \frac{b^2}{a}, \quad (10)$$

$$M_{\max} = \frac{f_2}{f_1}, \quad (11)$$

式中: a 表示椭球长轴半径; b 表示椭球短轴半径; f_1 表示第一焦距; f_2 表示第二焦距; R 表示曲率半径; L_1 表示物距; L_2 表示像距; M 表示成像倍率 (M_{\max} 表示可以实现的最大成像倍率)。根据所需的合成光源的照明尺寸和数值孔径等应用需求, 按照上述公式即可求得椭球反射镜参数及 MEMS 镜的动态调整范围。椭球镜静态参数与 MEMS 动态扫描之间的匹配是结构设计的关键技术之一。

假设入射光斑的直径为 D , 像方成像照明点的直径为 d , 椭球反射镜的角放大能力 (θ_2/θ_1) 约为 M 的倒数, 则椭球反射镜的成像倍率 M 还可表示为

$$M = \frac{D}{d} = \frac{L_1}{L_2} \approx \frac{\theta_2}{\theta_1}. \quad (12)$$

接下来对 MEMS 镜的动态扫描进行举例说明。为提高成像分辨率, 像方数值孔径 (NA) 通常大于 MEMS 镜处的物方 NA , 即 $\theta_2 > \theta_1$ 。根据式 (12) 可知 $M > 1$, 此时像点直径 d 小于入射光直径 D , 椭球镜对入射光进行了缩束。当 M 值大于 1 时, MEMS 镜转动产生一个小的角度范围 θ_1 , 就可以获得一个扩大的像方光束夹角 $M \cdot \theta_1$, 像方 NA 相应增大。在入射角度范围 θ_1 不变的情况下, 像方 NA 随着 M 值的增加而增大。因此, 傅里叶合成技术可以大大提高像方 NA , 增大照明发散度, 满足成像系统需求, 从而提高成像分辨率。此外, 通过设置 MEMS 镜扫描角度的范围可以生成光瞳面上所需的任意照明尺寸和照明部分相干因子 σ 。

2.3 傅里叶合成技术实现照明部分相干因子 σ 的灵活调节及改善照明均匀性

傅里叶合成照明技术可以实现照明部分相干因子 σ 的灵活调节。部分相干因子 σ 是光刻工艺中能提高分辨率的重要参数。部分相干因子 σ ($\sigma \leq 1$) 定义为光刻成像系统中入射光瞳的填充比例^[22], 即

$$\sigma = \frac{D_1}{D_2}, \quad (13)$$

式中: D_1 为照明系统填充的入射光瞳的直径; D_2 为成

像系统入射光瞳的直径。 D_1 由照明系统形成的掩模上的照明发散度 (θ_2) 或像方 NA 决定。结合式 (12) 和式 (13), 当扫描角度范围较小时可得出

$$D_1 \approx 2NA \cdot L = 2n \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \cdot L \approx nL \sin(M\theta_1), \quad (14)$$

$$\sigma \approx \frac{nL \sin(M\theta_1)}{D_2}, \quad (15)$$

式中: n 为折射率; L 为掩模与光瞳面之间的距离。因此, 当 D_2 和 L 为固定值时, 部分相干因子 σ 受限于照明系统的扫描角度范围 θ_1 和椭球镜成像倍率 M 。根据成像系统对照明发散度的要求, 傅里叶合成扫描技术通过控制照明系统中 MEMS 的二维扫描角度, 形成不同的扫描角度范围 θ_1 , 进而在成像系统入瞳面上实现不同的照明尺寸和照明相干因子 σ 。

傅里叶合成照明技术可以改善照明的均匀性。照明系统的主要功能是为后续成像系统提供符合照明尺寸要求且同时能满足所需发散度和照明模式的均匀照明^[7,23]。图 1(b) 所示为光瞳面上以环形照明为例的光斑扫描轨迹示意图, 图中环状白色线条表示光斑移动轨迹。可以观察到, 傅里叶合成照明技术在对小尺寸照明光斑进行角度扫描过程中, 通过对光斑进行不断的扫描叠加和逐步推进, 在光瞳面上形成了特定照明模式的均匀照明, 从而解决了初始光斑光强分布不均匀的问题。

3 仿真模型

采用光学仿真软件对傅里叶合成照明结构进行光路仿真建模。输入光束是波长为 532 nm 的平行光, 光斑直径为 0.7 mm。分别将 MEMS 镜与设计的两种不同参数的椭球反射镜 ($M=10$ 和 $M=2.5$) 进行仿真。在 MEMS 镜最大偏转角度范围内, 通过设置一系列 x 向和 y 向偏转角度, 生成不同形状的照明模式。

图 2(a) 是 MEMS 镜与 $M=10$ 的椭球反射镜的仿真光路图, 在仿真软件中采用多重结构建立了 $-0.5^\circ \sim +0.5^\circ$ 区间内的一维扫描传输模型。图 2(b) 是 MEMS 镜与 $M=2.5$ 的椭球反射镜的仿真光路图, 在仿真软件中采用多重结构建立了二维最大扫描角度为

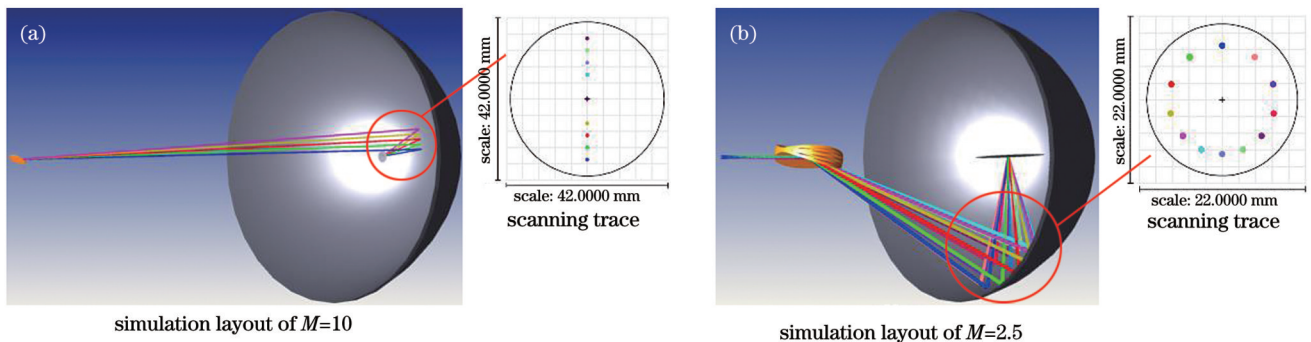


图 2 基于 MEMS 镜的反射式傅里叶合成照明光线轨迹的仿真建模。(a) $M=10$; (b) $M=2.5$

Fig. 2 Simulation model of ray path of reflective Fourier-synthesis illuminator based on MEMS mirror. (a) $M=10$; (b) $M=2.5$

±3°的环形扫描传输模型。建模中用若干离散点代表光线的动态扫描轨迹。

椭球镜焦点处的点列图如图 3 所示。从图 3 中可观察到各扫描视场的点列图基本重合,存在的微小分散是由单个椭球反射镜无法充分校正像差引起的。

$M=10$ 的椭球镜的全扫描视场点列图的几何最大半径值(GED RADIUS)为 43.405 μm ,则照明光斑直径为 86.81 μm 。 $M=2.5$ 的椭球镜的全扫描视场点列图的几何最大半径值为 182.340 μm ,则照明光斑直径为 364.68 μm 。

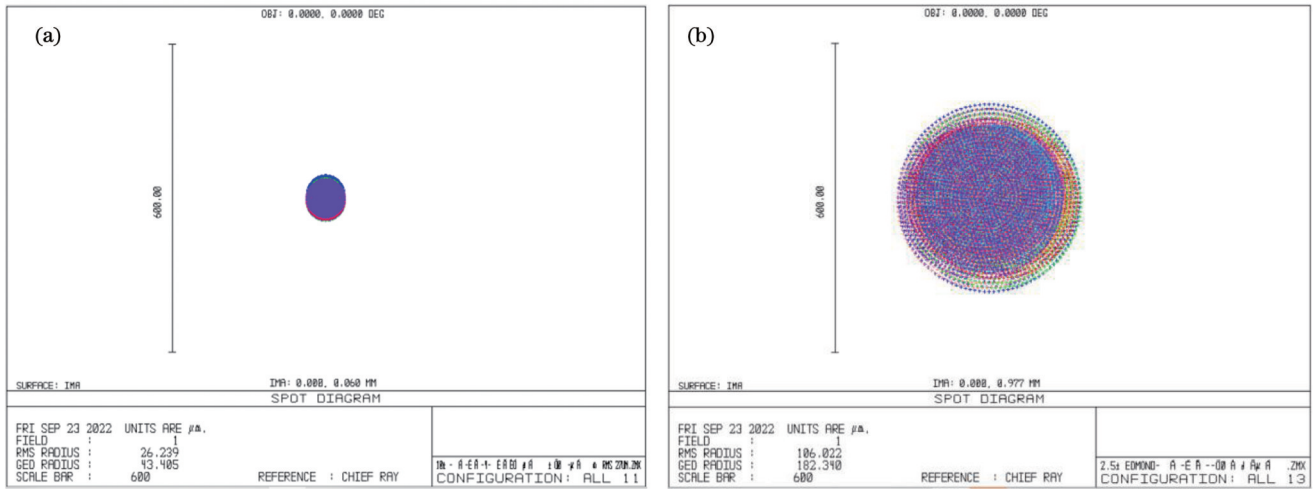


图 3 像面处包含全部扫描结构的点列图。(a) $M=10$;(b) $M=2.5$

Fig. 3 Spot diagrams of all scanning multi-configuration on image surface. (a) $M=10$; (b) $M=2.5$

MEMS 镜动态扫描产生的合成光源的照明模式仿真图如图 4 所示。MEMS 镜二维转动时光线扫描可生成不同的照明形状(仿真时仅以少量离散点作为代表),如图 4(b)~(e)所示。同时,合成照明光源的尺寸和分布间距均可调整,如图 4(d)~(e)

所示。通过修正 x 向角度和 y 向角度之间的比例因子,将 y 向的所有扫描角度乘以系数 $1/\cos \alpha$ (α 为 MEMS 镜入射角),可以解决照明形状在一维上呈现的压缩变形问题,实现照明形状基本无变形,二维结构对称。

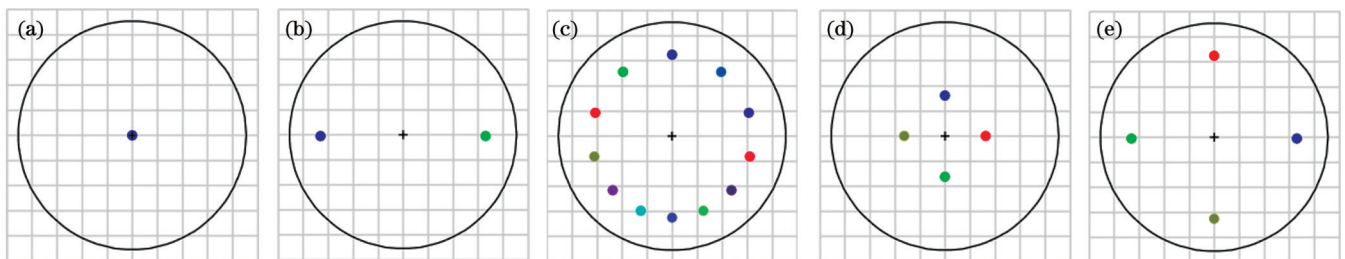


图 4 MEMS 镜角度扫描生成的照明模式的仿真图。(a)MEMS 镜静止时的照明点;(b)二极照明;(c)环形照明;(d)~(e)四极照明(不同分布间距)

Fig.4 Simulation of illumination patterns formed by MEMS mirror angle scanning. (a) Illumination point when MEMS mirror is not rotated; (b) dipole illumination; (c) annular illumination; (d)~(e) quadrupole illumination (different spacings)

当与照明系统配合使用的后续成像系统确定后,其入射光瞳直径为确定值。通过对照明系统 MEMS 镜的扫描角度范围进行调整,可以实现光瞳面上照明模式的选择、合成光源照明尺寸的变化以及照明部分相干因子 σ 的调节。

4 实验结果分析

本课题组搭建的傅里叶合成照明的可见光波段实验装置如图 5 所示,用其验证傅里叶合成照明技术实现任意照明模式和调整部分相干因子 σ 的可行性。结构中均采用反射元件,因此对其他波段(如极紫外波

段)应用的可行性均具有验证作用。

采用德国 LASOS 公司的 532 nm 激光器作为光源,输出口处光斑直径为 0.7 mm。采用美国 Mirroracle 公司的 MEMS 平面反射镜,其直径为 1.6 mm,频率高达 2 kHz,二维最大角度范围为 $-4^\circ \sim +4^\circ$ 。MEMS 镜安装在一维平移台上,便于精确调节。分别选用 $M=10$ 和 $M=2.5$ 的离轴椭球反射镜作为扫描光束的收集聚光镜。分束镜(代表掩模)处于椭球镜成像焦点位置处。

MEMS 扫描版图设计是实现合成照明光源无变形、光强均匀的关键因素之一。设计和优化不同照明

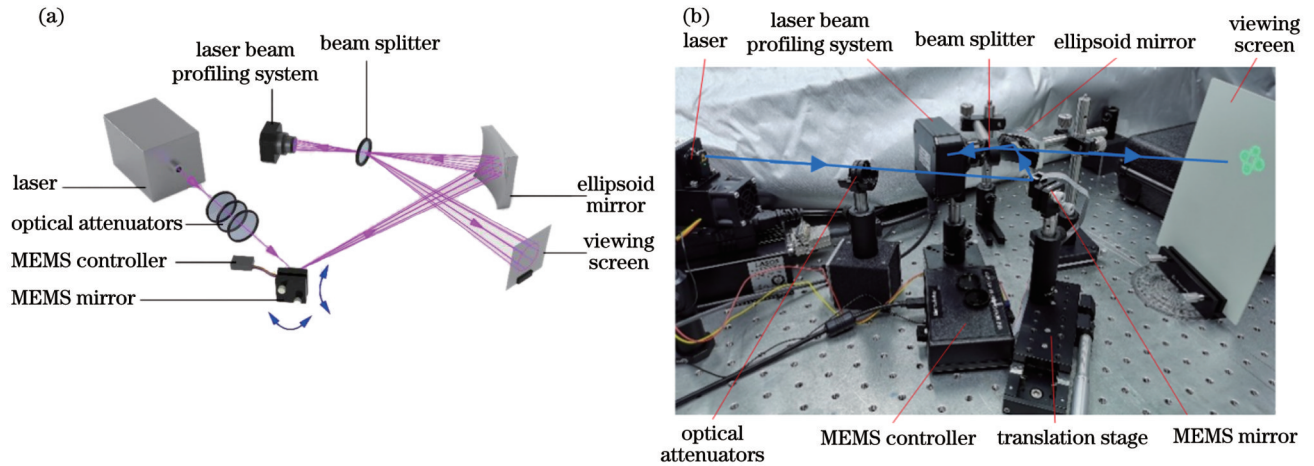


图 5 傅里叶合成照明的可见光实验装置。(a)示意图;(b)实物图

Fig.5 Visible light experimental setup for Fourier-synthesis illuminator. (a) Schematic diagram; (b) photograph

模式的扫描版图,根据实验图像反复改进版图中扫描光线的轨迹路线和角度修正因子。通过调整 MEMS 镜扫描角度范围和扫描轨迹路线可以实现具有不同照明尺寸和分布间距的照明模式,如图 6 所示。

由于光束质量分析仪的探测面积较小,故将其放置于椭球镜成像焦点附近采集合成照明模式。MEMS 动态扫描时生成的包含圆盘形、环形、二极、四

极等照明模式的实验测试图如图 6(b)~(p)所示。与图 6(a)所示的激光器初始光斑相比,合成照明的最大尺寸、照明区域尺寸、照明分布间距等参数都可以调整。当 MEMS 扫描角度为 $\pm 1^\circ$ 且选用 $M=10$ 的椭球聚光镜(物距为 1 m)时,可以观察到聚光镜上的最大扫描照明尺寸超过了 30 mm,经计算可知成像焦点处的像方 $4 \times NA$ 将超过 0.6。

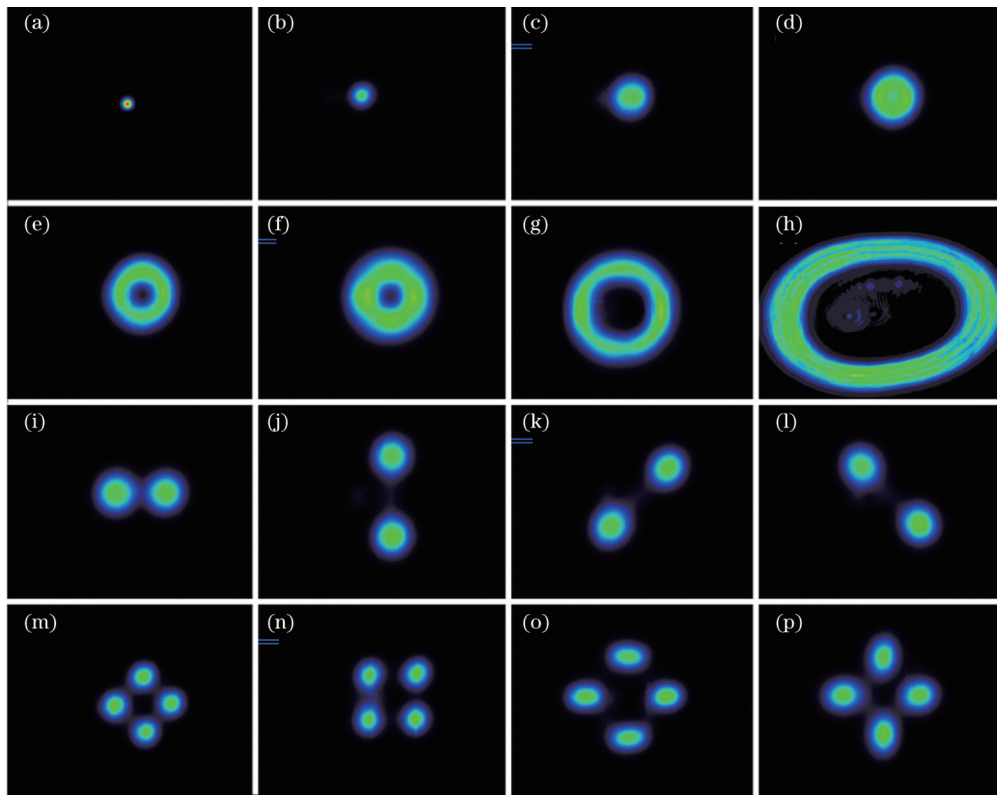


图 6 光束质量分析仪采集的椭球镜成像后的照明模式测试图。(a)初始光斑;(b)~(d)圆盘照明;(e)~(h)环形照明;(i)~(l)二极照明;(m)~(p)四极照明

Fig. 6 Illumination patterns for ellipsoidal mirror imaging tested by beam profiling system. (a) Initial laser spot; (b)~(d) disk illumination; (e)~(h) annular illumination; (i)~(l) dipole illumination; (m)~(p) quadrupole illumination

同时,采用光束质量分析仪测试椭球镜焦点处(即掩模面上)的照明区域尺寸,测试结果如图 7 所示。

图 7(a)为激光器的初始光斑分布,峰值强度 86.5% 处的光斑直径为 0.807 mm。图 7(b)、(c)为 MEMS 动态

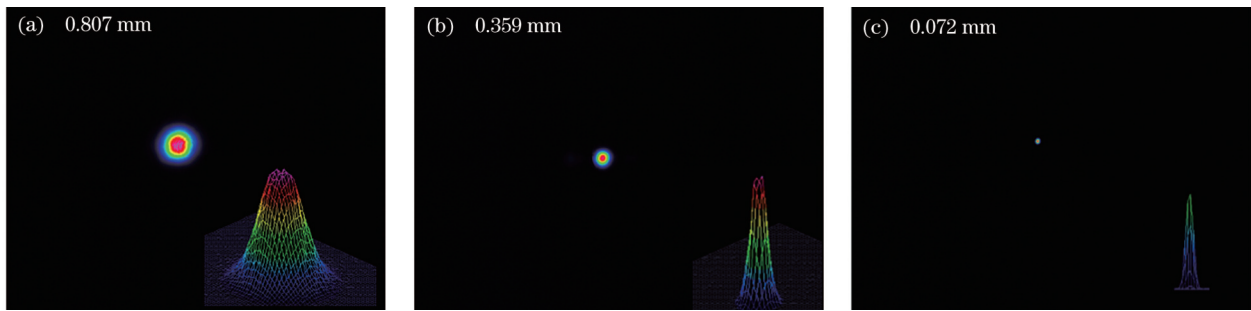


图7 光束质量分析仪采集的椭球镜成像焦点处的照明尺寸。(a)激光器初始光斑尺寸;(b) $M=2.5$ 的椭球镜的像点尺寸;(c) $M=10$ 的椭球镜的像点尺寸

Fig.7 Illumination size on ellipsoidal mirror focus tested by beam profiling system. (a) Initial laser beam size; (b) image size of ellipsoidal mirror with $M=2.5$; (c) image size of ellipsoidal mirror with $M=10$

扫描时在椭球镜成像焦点处的照明尺寸。可以发现,不论入射光如何动态扫描,最终均成像在焦点处。

图7(b)是 $M=2.5$ 的椭球镜焦点处的光斑,其峰值强度86.5%处的直径为0.359 mm。计算可知实际倍率为 $0.807/0.359=2.25$ 。图7(c)是 $M=10$ 的椭球镜焦点处的光斑,其峰值强度86.5%处的直径为0.072 mm。计算可知实际倍率为 $0.807/0.072=11.21$ 。根据物像空间不变式,像方尺寸的缩小代表着像空间数值孔径的相应提高,有助于提高成像分辨率。

对于 $M=2.5$ 和 $M=10$ 的两种椭球镜,实验测试所得光斑直径0.359 mm和0.072 mm与上文仿真建模所得点列图直径 $364.68\ \mu\text{m}$ 和 $86.81\ \mu\text{m}$ 基本接近。实验测试所得的光束倍率与理论倍率之间存在微小差异,分析后可知原因如下:1)椭球镜像距较小,光束质量分析仪较大的机械外壳尺寸导致其探测面无法准确地位于椭球镜的理想焦点位置,进而使测试光斑尺寸与理想值之间产生偏差;2)物距和像距的调整存在一定误差。

5 结 论

本文提出了一种基于傅里叶合成技术的照明系统,对其优点进行了分析,并描述了结构核心元件——离轴椭球反射镜的参数计算方法以及MEMS镜动态角度扫描实现合成照明模式的过程。采用Zemax光学仿真软件建立了两种具有不同椭球镜结构参数的傅里叶合成照明光路传输模型,展示了MEMS镜动态扫描实现的不同离轴照明模式。最后在建立的傅里叶合成照明可见光实验装置中测试得到了圆盘、二级、四级、环形等多种照明模式,实现了理论计算、仿真建模与实验验证的统一。本文完成了傅里叶合成技术实现任意照明模式选择以及照明尺寸调整和部分相干因子调节的可行性验证,证明了傅里叶合成照明技术能够满足成像系统所需的离轴照明和照明发散度。在目前的实验结果中,合成光源光强分布的均匀性以及四级照明的轻微畸变问题还存在进一步改善的空间,可作为后续实验研究的改进方向。

参 考 文 献

- [1] 王君,金春水,王丽萍,等.极紫外光刻离轴照明技术研究[J].光学学报,2012,32(12):1211003.
Wang J, Jin C S, Wang L P, et al. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211003.
- [2] 郭立萍,黄惠杰,王向朝.光学光刻中的离轴照明技术[J].激光杂志,2005,26(1):23-25.
Guo L P, Huang H J, Wang X Z. Off-axis illumination for optical lithography[J]. Laser Journal, 2005, 26(1): 23-25.
- [3] 赵阳.深紫外光刻复杂照明光学系统设计[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2010:14-15,51-74.
Zhao Y. Design of complex illumination optical system for deep ultraviolet lithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 14-15, 51-74.
- [4] 赵阳,巩岩.深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J].光学精密工程,2011,19(1):29-34.
Zhao Y, Gong Y. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 29-34.
- [5] 张巍,巩岩.投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J].光学精密工程,2008,16(11):2081-2086.
Zhang W, Gong Y. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2081-2086.
- [6] Prince K C, Allaria E, Callegari C, et al. Coherent control with a short-wavelength free-electron laser[J]. Nature Photonics, 2016, 10(3): 176-179.
- [7] 刘佳红,张方,黄惠杰.步进扫描投影光刻机照明系统技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2022,59(9):0922011.
Liu J H, Zhang F, Huang H J. Research progress on illumination system technology of step-and scan projection lithography tools[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922011.
- [8] 曾宗顺,张方,牛志元,等.基于遗传算法的微反射镜阵列角位置分布算法[J].中国激光,2020,47(8):0805003.
Zeng Z S, Zhang F, Niu Z Y, et al. Angular position distribution algorithm of micro mirror array based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0805003.
- [9] Mochi I, Kim H S, Locans U, et al. Illumination control in lensless imaging for EUV mask inspection and review[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11323: 113231I.
- [10] Wojdyla A, Benk M P, Naulleau P P, et al. EUV photolithography mask inspection using Fourier ptychography[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10656: 106560W.
- [11] Naulleau P P, Denham P E, Hoef B, et al. A design study for synchrotron-based high-numerical-aperture scanning illuminators[J]. Optics Communications, 2004, 234(1/2/3/4/5/6): 53-62.

- [12] Naulleau P P, Goldberg K A, Batson P, et al. Fourier-synthesis custom-coherence illuminator for extreme ultraviolet microfield lithography[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(5): 820-826.
- [13] Han K, Rilpho L, Gosse C, et al. Radiation system: US20200152345A1[P]. 2020-05-14.
- [14] Christopher N, Ryan H, Patrick P. Low-speckle holographic beam shaping of high-coherence EUV sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7969: 796938.
- [15] Kenneth A, Iacopo M, Markus B, et al. Commissioning an EUV mask microscope for lithography generations reaching 8 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8679: 867919.
- [16] Yalcinkaya A D, Urey H, Brown D, et al. Two-axis electromagnetic microscanner for high resolution displays[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(4): 786-794.
- [17] Bencivenga F, Capotondi F, Principi E, et al. Coherent and transient states studied with extreme ultraviolet and X-ray free electron lasers: present and future prospects[J]. *Advances in Physics*, 2014, 63(5/6): 327-404.
- [18] 张润南, 蔡泽伟, 孙佳嵩, 等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(18): 1811003.
Zhang R N, Cai Z W, Sun J S, et al. Optical-field coherence measurement and its applications in computational imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(18): 1811003.
- [19] 李新华, 杨忠明, 高志山, 等. 一种大口径离轴反射式太阳模拟系统设计[J]. *应用光学*, 2015, 36(5): 709-716.
Li X H, Yang Z M, Gao Z S, et al. Design of large-aperture off-axis reflective solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, 36(5): 709-716.
- [20] 吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 太阳模拟器中椭球面聚光镜参数的确定[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 43-47.
Lü T, Zhang J X, Fu D H, et al. Determination of ellipsoid condenser parameters in solar simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 43-47.
- [21] 万国贤. 离轴椭球面反射系统的设计[J]. *光学精密工程*, 1995, 3(3): 22-24.
Wan G X. Design of non-coaxial ellipsoid reflective system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1995, 3(3): 22-24.
- [22] 刘菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0222003.
Liu F, Li Y Q. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0222003.
- [23] 马晓喆, 张方, 黄惠杰. 光刻机照明光场强度分布校正技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2005001.
Ma X Z, Zhang F, Huang H J. Correction technology for illumination field intensity profile in photolithography machine[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2005001.

Lithography Illumination System Based on Fourier Synthesis Technology

Li Hui, Wu Xiaobin*, Han Xiaoquan, Ma He, Sha Pengfei

R & D Center of Optoelectronic Technology, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract

Objective Off-axis illumination is an important resolution enhancement technology in lithography, and it can effectively enhance both resolution and the focal depth of the lithography tool. Conventional off-axis illumination methods, such as those using pupil filters, have the disadvantage of serious energy loss. Moreover, realizing a few special illumination patterns is difficult using transmission elements represented by an axicon, and diffractive elements have the problem that a single diffractive element corresponds to only one illumination pattern. In the EUV spectral band, because optical materials intensely absorb EUV radiation, the transmission elements and transmission type diffraction optical elements cannot be used. In the present study, we investigate an illumination system based on Fourier synthesis technology. It has advantages of realizing any off-axis illumination patterns, increasing imaging numerical aperture (NA), high energy efficiency, and wide applicability in various spectral bands, especially for applications in the EUV spectrum. We hope that our research results will improve the understanding of Fourier synthesis technology and achieve an illumination technology that limits illumination divergence and can easily provide uniform illumination, making it useful in applications such as lithography projection exposure and mask defect detection.

Methods We use a micro-electro-mechanical systems (MEMS) mirror combined with an off-axis ellipsoidal mirror to construct our Fourier synthesis illumination device. The surfaces of the MEMS and ellipsoidal mirrors are coated with a high reflectivity film for working wavelength. Based on the characteristic high-frequency two-dimensional rotation of the MEMS mirror, with the support of an optimization scan program, we set ray-scanning paths of the MEMS mirror in the x and y directions, achieving various illumination patterns such as disk, dipole, quadrupole, and annular, and adjust the partial coherent factor. The scanning ray is then collected and imaged by using the ellipsoidal mirror with two imaging focal points, whose surface to be detected (such as the mask) is located at the focal point. The Fourier synthesis illumination device provides uniform illumination with the required illumination pattern and illumination divergence to the surface to be detected. In this study, the imaging characteristics of two ellipsoidal mirrors with different magnifications of $M=10$ and $M=2.5$ are verified, and the simulation results are found to be basically consistent with the experimental test results.

Results and Discussions The Fourier synthesis illumination device composed of MEMS and off-axis ellipsoidal mirrors can achieve various illumination patterns such as disk, dipole, quadrupole, and annular and the illumination area size (representing the partial coherent factor) and spacing of the illumination area can be adjusted. The tested illumination profile has no distortion and the illuminating intensity distribution is relatively uniform. When the MEMS scanning angle is $\pm 1^\circ$ and the magnification of the

ellipsoidal condenser is 10 (i. e. , with an object distance of 1 m), the maximum illumination diameter can reach >30 mm on the condenser, and the $4\times NA$ on the ellipsoid focal surface can reach >0.6 . Moreover, the illumination area on the surface to be detected located at the imaging focal point of the ellipsoidal mirror was tested, and all scanning rays were concentrated in the same area on the surface to be detected. Neither the scanning mode nor scanning angle influences the position of the overlapping area. Ellipsoidal mirrors with different magnifications can be used to adjust the size of the illumination area on the surface, and the actual magnification of the illumination area is basically consistent with the theoretical value.

Conclusions The Fourier synthesis technique based on MEMS and off-axis ellipsoidal mirror is studied and an experimental confirmatory device is set up. The feasibility of Fourier synthesis technology is verified, and it can achieve various illumination patterns and illumination size by adjusting the pupil and partial coherent factor. The experiment demonstrates that Fourier synthetic illumination technology can meet the requirements of off-axis illumination and illumination divergence of imaging systems. Our research shows that Fourier synthesis technology is an illumination method that can be easily meet illumination requirements. There are only two main reflection elements needed to minimize energy loss, and their reflection characteristics are widely applicable over a wide spectral range.

Key words Fourier optics; Fourier synthesis; photolithography technology; off-axis illumination; ellipsoidal condenser; angle scanning