

基于远场干涉的扫描干涉场曝光光学系统设计与分析

鲁森^{1,2}, 杨开明^{1,2*}, 朱煜^{1,2}, 王磊杰^{1,2}, 张鸣^{1,2}

¹清华大学机械工程系摩擦学国家重点实验室, 北京 100084;

²清华大学机械工程系精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084

摘要 高斯光在远离束腰位置能得到直线度极高的干涉条纹, 基于此提出了一种基于远场干涉的新型扫描干涉场曝光(SBIL)系统。建立了条纹相位非线性误差关于高斯光束腰半径、入射角度及束腰到基底距离的解析表达式。通过数值仿真, 详细分析了条纹相位非线性误差与上述参数的关系。研究表明, 该光学系统可以有效地将条纹相位非线性误差限制在纳米量级, 并具有光路简洁、装调误差宽容度较高的优点。适当缩短束腰到基底的距离, 可有效解决曝光光斑边界处条纹相位非线性误差恶化的问题。

关键词 衍射; 扫描干涉场曝光; 干涉条纹; 高斯激光; 空间滤波器; 菲涅耳衍射

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0605001

Design and Analysis of Scanning Beam Interference Lithography Optical System Based on Far-Field Interference

Lu Sen^{1,2}, Yang Kaiming^{1,2}, Zhu Yu^{1,2}, Wang Leijie^{1,2}, Zhang Ming^{1,2}

¹State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

²Beijing Key Laboratory of Precision/Ultra-Precision Manufacturing Equipments and Control, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract Extremely straight interference fringes can be formed at the position far away from the waist of Gaussian beams and based on this principle, a novel far-field-interference-based scanning beam interference lithography (SBIL) optical system is proposed. The analytic expression of the nonlinear error with respect to waist radius of Gaussian beams, the incident angle and the waist-to-substrate distance is established. By the numerical simulation, the relationships between the nonlinear error of fringes and the above parameters are analyzed in detail. The research results show that this optical system can effectively limit the nonlinear error of fringe phase to the nanometer scale, and possesses the advantages of simple optical path and high tolerance of assembly errors. The problem that the nonlinear error of fringes at the boundary of the exposure spot is deteriorated can be effectively solved if the waist-to-substrate distance is suitably shortened.

Key words diffraction; scanning beam interference lithography; interference fringe; Gaussian beam; spatial filter; Fresnel diffraction

OCIS codes 050.2770; 050.1940; 110.2650; 080.3620

1 引 言

扫描干涉场曝光(SBIL)是利用两束通过空间滤波器的高斯光束, 在基底上形成直径为几毫米的

小干涉场, 通过工件台的步进扫描运动对涂有光刻胶的基底进行曝光^[1-4]。该曝光技术有效克服了全息曝光中单次大面积曝光引起的光栅非线性问题, 同时极大提高了光栅的制造效率。

收稿日期: 2017-12-14; 收到修改稿日期: 2018-01-30

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702-006)

作者简介: 鲁森(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事扫描干涉光刻系统方面的研究。E-mail: lus13@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 朱煜(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事面向集成电路制造装备的超精密机械系统设计、超精密测量、超精密运动控制等方面的研究。E-mail: zhuyu@tsinghua.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: yangkm@tsinghua.edu.cn

Schattenburg 等^[1-2]最早提出了 SBIL 技术,并设计了 Nanoruler 光栅制造系统。该系统利用多个长焦距中继透镜、聚焦透镜及准直透镜进行高斯光束的束腰传递变换,兼顾空间滤波需要,设计出长约 20 m 的复杂系统光路,同时也存在以下问题^[5]:为抑制外界扰动影响,需要代价昂贵的环境控制系统;结构复杂的光学系统带来了极大的装调难度,尤其是高斯束腰需进行精密传递;特殊加工的长焦距、非标准焦距、精密透镜增加了系统搭建成本。此外,还需设计复杂的波前测量系统,精确测量干涉图形的相位非线性误差^[6],系统复杂性增加。

目前,SBIL 系统大多将高斯激光的束腰调整到基底表面,以获得具有纳米级直线度的干涉条纹。文献[7-8]中均采用准直镜,通过调整准直镜的空间位置将高斯激光的束腰调整到基底处。该方法可以获得相位非线性误差仅为纳米量级的干涉条纹,但其受限于准直镜的像差,并且对准直镜与小孔的相对位置极其敏感^[8],光学系统的装调难度极高。

关于高斯光经过小孔衍射后引起的曝光参数变化研究鲜有报道。韩建等^[9]研究了干涉光刻中小孔孔径与衍射后高斯光束腰和轴上光强的对应关系,并据此给出了小孔半径的选择合理区间(高斯光束束腰半径的 1.52~2.2 倍),但未分析高斯光特征参数变化对实际曝光的影响。

高斯光在束腰处和无穷远处的波前曲率半径均为无穷大,且在这两个区域均可获得相位非线性误差最小的干涉条纹^[10],基于这一原理,本文提出了一种基于远场干涉的 SBIL 光学系统设计方案。根据高斯光传播特性,设计了基于远场干涉的 SBIL 光学系统,建立了干涉条纹相位非线性误差与高斯光束腰、入射角度及束腰到基底距离之间的数学模型,通过数值仿真的方法,分析了以上关键参数对相位非线性误差的影响。分析了小孔衍射对干涉条纹相位非线性误差的影响,为了满足扫描干涉场条纹纳米级直线度的要求,对光路进行调整并验证了改进方案。

2 基于远场干涉的 SBIL 系统

由于高斯光在无穷远处的曲率为零,传统干涉光刻^[11-12](IL)系统采用远场干涉的方式进行曝光,但实际光路不可能无穷远,且干涉光刻所需的曝光面积较大,导致曝光边缘处的条纹无法满足纳米级直线度的要求。所设计的 SBIL 系统仅需直径为毫米量级的曝光面积,理论上可以在整个曝光区域内

获得纳米级直线度的干涉条纹。

图 1 所示为设计的 SBIL 系统^[13],其中光学系统主要包括激光器、声光调制器(AOM)、空间滤波器、光电探测器(相位计)、数据采集卡和工控机。系统光源为瑞典 Cobolt 公司生产的 Zouk 型激光器,其出射光束腰半径为 0.35 mm,出射光波长 λ 为 355 nm。为制作周期为 251 nm 的光栅,高斯激光与基底的夹角 θ 设置为 45° 。

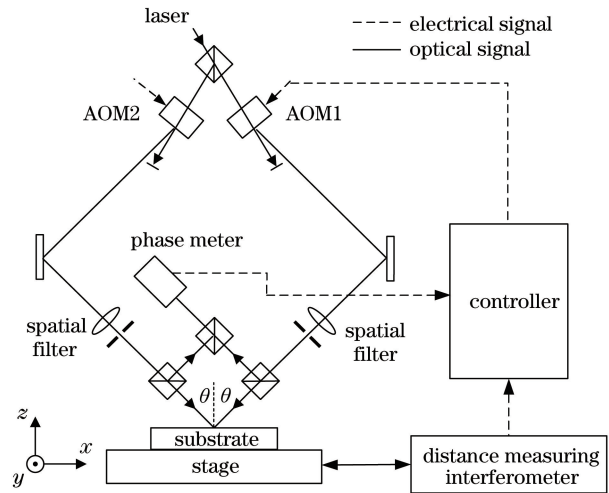


图 1 SBIL 系统示意图

Fig. 1 Schematic of SBIL system

激光器发出的高斯光在自由空间和光学元件中传播,则沿 z 轴传播的光束复振幅大小^[10]可描述为

$$E(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\exp[-ikz + i\varphi(z)]}{\omega(z)} \times \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)} - ik \frac{x^2 + y^2}{2R(z)}\right], \quad (1)$$

式中 $R(z)$ 为波前曲率半径, $\varphi(z)$ 为 Gouy 相位,波数 $k = 2\pi/\lambda$, $\omega(z)$ 为电磁场强度降到轴向 $1/e^2$ 处的半径, x, y, z 为基底坐标系 xyz 下的坐标。任意位置的光束半径 $\omega(z)$ 可写为

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{b}\right)^2}, \quad (2)$$

式中 ω_0 为束腰半径;参数 b 为高斯光传播的瑞利范围,表示为

$$b = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}. \quad (3)$$

波前曲率半径沿 z 轴的变化规律可表示为

$$\frac{1}{R(z)} = \frac{z}{z^2 + b^2}. \quad (4)$$

Gouy 相位表示额外的相移,表达式为

$$\varphi(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{b}\right). \quad (5)$$

空间滤波器由聚焦镜和小孔组成。当小孔直径为 $2a$ 时,束腰半径为 ω_0 的高斯光可穿过的能量 P' 表示为

$$P' = P \left[1 - \exp\left(-\frac{2a^2}{\omega_0^2}\right) \right], \quad (6)$$

式中 P 为穿过小孔前的高斯光能量。为取得滤波效果和通过能量的平衡,通常选用直径为 $\pi\omega_0$ 的小孔^[7,14],按(6)式计算出此时 99% 的高斯光能量可以通过小孔,同时可滤除高斯光中空间频率大于 ω_F 的成分, ω_F 可表示为

$$\omega_F = \frac{ka}{f}, \quad (7)$$

式中 f 为聚焦镜的焦距。

高斯光聚焦后在束腰位置穿过小孔,空间滤波器可消除高斯光中的高频噪声,同时高斯光束的特征参数也发生了变化。利用文献[7]中给出的薄透镜计算公式,可以得到穿过聚焦镜变化后的光束特性,结果见表 1,其中分别给出了输入端和输出端的束腰半径 ω' 、束腰与透镜距离 z' 、光束发散角 β 、瑞利范围 b 。

表 1 穿过焦距为 175 mm 的聚焦镜后光束的特性变化
Table 1 Property changes of beams after passing through lens with a focal length of 175 nm

Parameter	ω' / mm	z' / m	β / mrad	b / m
Input	0.35	0.743	0.65	1.084
Output	0.05	0.187	4.5	0.02217

实际曝光光斑为椭圆,为了方便说明,以椭圆短半轴代表曝光半径。曝光光斑直径的设计值为 1.4 mm(光强大于轴向光强 $1/e^2$ 区域对应的光斑直径)。根据(2)式传播距离与穿过小孔后高斯光束半径的关系,可计算出束腰为 $50 \mu\text{m}$ 的高斯光对应的传播距离 d 为 435.8 mm,如图 2 所示。

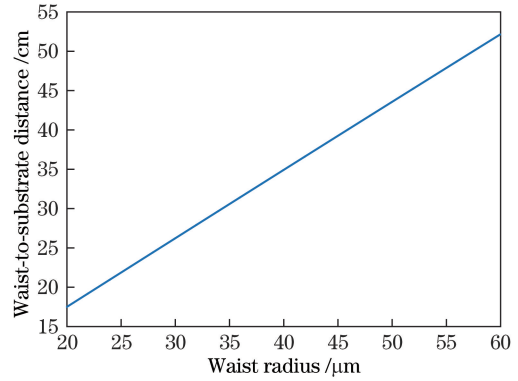


图 2 束腰半径与束腰到基底距离间的关系
Fig. 2 Relationship between beam waist radius and waist-to-substrate distance

基于以上分析,确定单独光路中的设计参数,如图 3 所示,其中下角标 i 表示入射光路, o 表示出射光路。实际曝光中,曝光区域内的光强分布将直接影响曝光结果,而条纹相位非线性误差是影响光强分布的关键参数,需单独对其展开分析。两束高斯光在远场相互干涉时,在 xy 平面上形成明暗相间的条纹,如图 4 所示。要分析 xy 平面内的干涉条纹,首先需要将左右坐标系转换到主坐标系下,转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & 0 & -\sin \theta_R \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_R & 0 & -\cos \theta_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - d_R \sin \theta_R \\ y \\ z - d_R \cos \theta_R \end{bmatrix} \Big|_{z=0} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_R \\ y \\ -x \sin \theta_R + d_R \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_L & 0 & \sin \theta_L \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_L & 0 & -\cos \theta_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x + d_L \sin \theta_L \\ y \\ z - d_L \cos \theta_L \end{bmatrix} \Big|_{z=0} = \begin{bmatrix} x \cos \theta_L \\ y \\ x \sin \theta_L + d_L \end{bmatrix}, \quad (9)$$

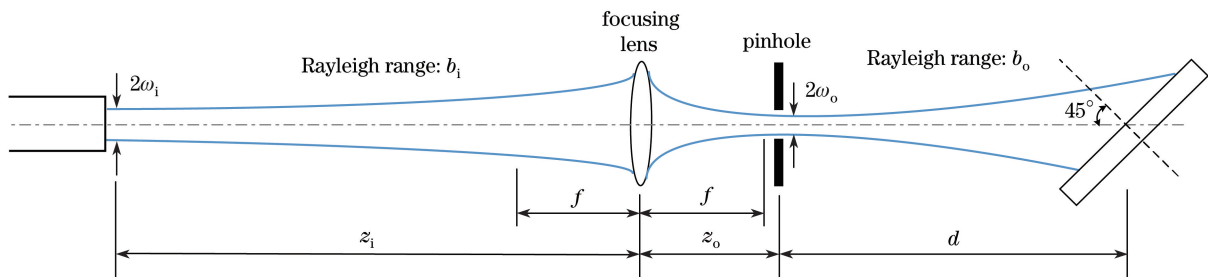


图 3 单光路设计示意图
Fig. 3 Diagram of single light path design

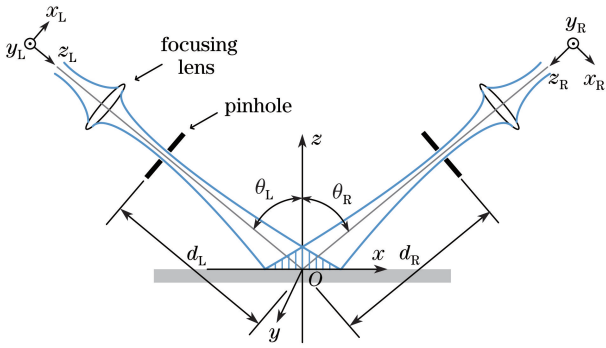


图 4 高斯激光远场干涉示意图

Fig. 4 Far-field interference of Gaussian beams

式中 θ_L 和 θ_R 分别为左右两路入射光与 z 轴间的夹角, d_L 和 d_R 分别为左右两路入射情况下小孔到干涉条纹中心的距离, x_L, y_L, z_L 和 x_R, y_R, z_R 分别为左、右光路坐标系 $x_L, y_L, z_L, x_R, y_R, z_R$ 下的坐标。下一节将对干涉条纹的相位非线性误差进行详细分析。

3 干涉条纹相位非线性误差分析

为了获得纳米级直线度的干涉条纹, 必须在靠近高斯光束束腰位置或远场处进行干涉。区分两者的边界是瑞利范围 ($z = b$), 该处高斯光的波前曲率最大。图 5 所示为高斯光传播距离 z 与波前曲率半径倒数 $1/R$ 的关系曲线, 利用瑞利范围 b 对两者已作归一化处理。

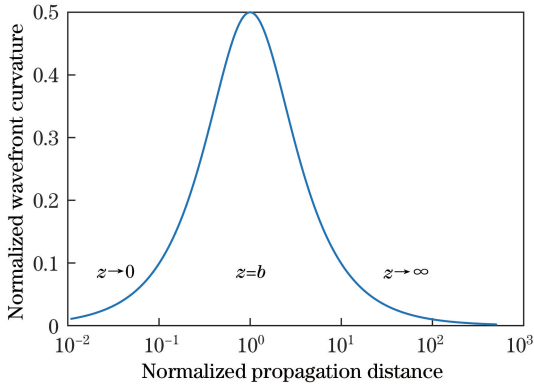


图 5 高斯光波前曲率分布曲线

Fig. 5 Wavefront curvature distribution curve of Gaussian beam

从(1)式可以看出, 高斯光的相位由 kz 、 $\varphi(z)$ 和 $k(x^2 + y^2)/[2R(z)]$ 三部分组成, 图 4 中左右两路高斯光的相位可写为

$$\begin{cases} \phi_R(x_R, y_R, z_R) = -kz_R + \varphi(z_R) - k \frac{x_R^2 + y_R^2}{2R(z_R)} \\ \phi_L(x_L, y_L, z_L) = -kz_L + \varphi(z_L) - k \frac{x_L^2 + y_L^2}{2R(z_L)} \end{cases} \quad (10)$$

在左右光束的交叉区域形成干涉场, 位于 $z = 0$

平面内的干涉场相位可写为

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = \phi_L(x_L, y_L, z_L) - \phi_R(x_R, y_R, z_R) = \\ k \left[(z_R - z_L) + \frac{x_R^2 + y_R^2}{2R(z_R)} - \frac{x_L^2 + y_L^2}{2R(z_L)} \right] + \\ [\varphi(z_L) - \varphi(z_R)]. \end{aligned} \quad (11)$$

利用(8)、(9)式, 可将 $\phi(x, y, z)$ 中的 (x_L, y_L, z_L) 和 (x_R, y_R, z_R) 转换到主坐标 (x, y, z) :

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = -kx(\sin \theta_R + \sin \theta_L) + \\ \tan^{-1} \left[\frac{\lambda(x \sin \theta_L + d_L)}{\pi \omega_{oL}^2} \right] - \\ \tan^{-1} \left[\frac{\lambda(-x \sin \theta_R + d_R)}{\pi \omega_{oR}^2} \right] + \\ \frac{k}{2} \left[\frac{(x^2 \cos^2 \theta_R + y^2)(-x \sin \theta_R + d_R)}{(-x \sin \theta_R + d_R)^2 + (\pi \omega_{oR}^2 / \lambda)^2} - \right. \\ \left. \frac{(x^2 \cos^2 \theta_L + y^2)(-x \sin \theta_L + d_L)}{(-x \sin \theta_L + d_L)^2 + (\pi \omega_{oL}^2 / \lambda)^2} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

式中 ω_{oL} 和 ω_{oR} 分别为左右高斯光束经过小孔后的束腰半径。

干涉条纹相对坐标原点的相位非线性误差 $\phi_e(x, y)$ 可表示为

$$\phi_e(x, y) = \phi(x, y) - 2\pi \frac{x}{p} - \phi(0, 0), \quad (13)$$

式中 p 为干涉条纹的周期。SBIL 具有均化效果, 两次扫描曝光没有对准误差时, 两次曝光叠加处的非线性误差将小于单次曝光的误差。为分析可能出现的最大相位非线性误差, 对单次曝光干涉场的相位非线性误差展开研究。

由以上推导结果可以看出, 干涉场内特定位置的相位非线性误差与 $d_L, d_R, \theta_L, \theta_R, \omega_{oL}$ 和 ω_{oR} 6 个参数相关。因为装调误差必然存在, 所以左右光路不可能完全对称。下面通过数值计算的方法, 分析不同装调情形下干涉条纹非线性误差在曝光光斑内的分布情况, 并生成对应的等高线图。图 6 所示为左右光路完全对称、不存在装调误差时, 干涉条纹相位非线性误差的分布情况, 可作为其他情况的参考。图 6 中红色椭圆内代表曝光光斑, 椭圆短半轴为 0.7 mm, 长半轴为 1.0 mm。在椭圆长轴端点 $(\pm 1.0, 0)$ 处, 相位非线性误差最大, 为 1.273 nm。

当右光路束腰到基底中心距离 d_R 比其基值小 1 mm 而其他值无变化时, 干涉条纹的相位非线性误差分布如图 7(a) 所示。由图 5 可知, 光路越短, 对应的高斯光波前曲率越大, 干涉后形成的条纹直线度越低。因此, 以小于基值的 d_R 作误差分析更能说明问题。此时干涉条纹的最大相位非线性误差为 2.188 nm。

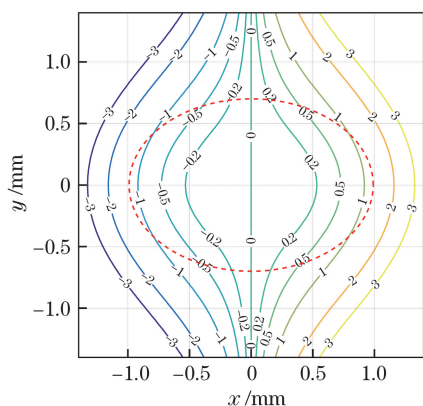


图 6 无装调误差时相位非线性误差分布
(曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 6 Nonlinear error distribution of phase without assembly error (unit of error data in curves is nm)

图 7(b)所示为当 d_R 和 d_L 相对基值均减小 20 mm 时的非线性误差分布图。此时,左右光路长度缩短,但仍保持对称。此时,条纹的最大相位非线性误差为 1.398 nm,比图 6 所示的数值略大。如果再引入 1 mm 的相对偏差,得到的相位非线性误差分布如图 7(c)所示,最大相位非线性误差增大到 2.397 nm。

当小孔处的束腰半径 ω_{oR} 和 ω_{oL} 分别减小 $1 \mu\text{m}$ 和增大 $1 \mu\text{m}$ 时,干涉条纹的相位非线性误差分布如图 8 所示,此时最大相位非线性误差为 1.436 nm。

当小孔处的束腰半径 ω_{oR} 和 ω_{oL} 分别减小 $1 \mu\text{m}$ 和增大 $1 \mu\text{m}$,同时 d_R 和 d_L 分别减小 21 mm 和 20 mm 时,干涉条纹的相位非线性误差分布如图 9 所示,此时最大相位非线性误差为 2.585 nm。

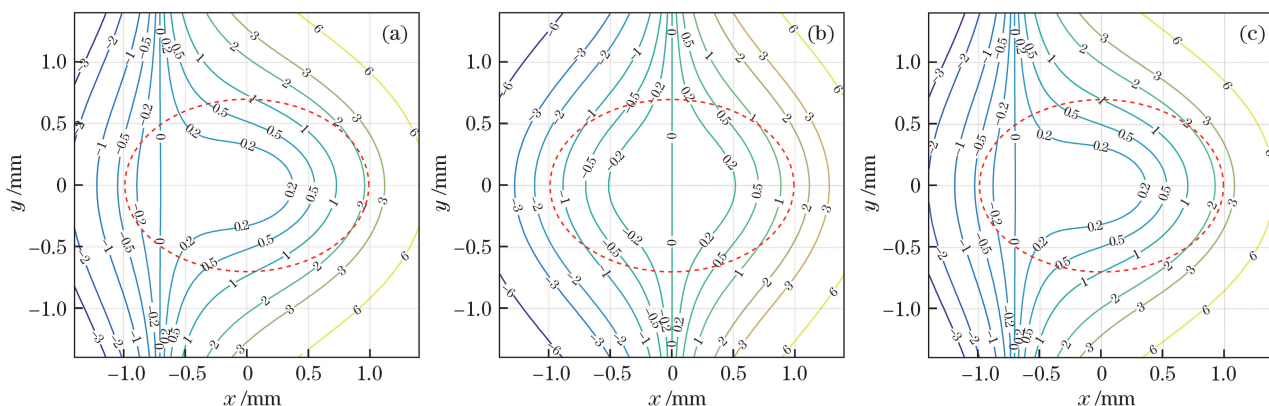


图 7 束腰到基底距离存在装调误差时的相位非线性误差分布(曲线中误差数据单位为 nm)。

(a) d_R : -1 mm; (b) d_R : -20 mm, d_L : -20 mm; (c) d_R : -21 mm, d_L : -20 mm

Fig. 7 Nonlinear error distribution of phase with waist-to-substrate assembly errors (unit of error data in curves is nm).

(a) d_R : -1 mm; (b) d_R : -20 mm, d_L : -20 mm; (c) d_R : -21 mm, d_L : -20 mm

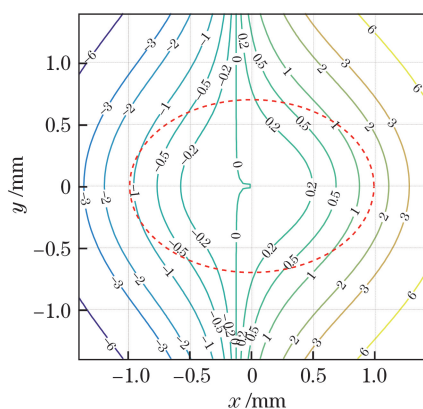


图 8 束腰半径存在误差时的相位非线性误差分布
(曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 8 Nonlinear error distribution of phase with waist radius errors (unit of error data in curves is nm)

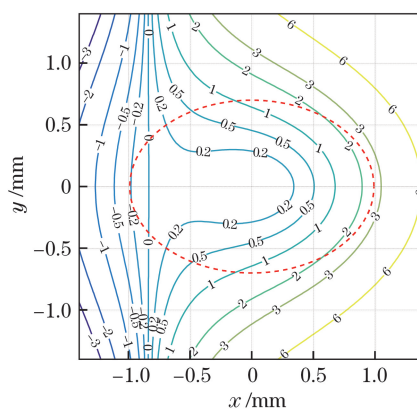


图 9 存在两种装调误差时的相位非线性误差分布
(曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 9 Nonlinear error distribution of phase with two kind of assembly errors (unit of error data in curves is nm)

图 10 所示为装调误差最大情况下的相位非线性误差分布图。其中,束腰处的小孔半径 ω_{oR} 和 ω_{oL}

分别减小 $1 \mu\text{m}$ 和增大 $1 \mu\text{m}$, d_R 和 d_L 分别减小 21 mm 和 20 mm, 左右入射角 θ_R 和 θ_L 分别减小

200 μrad 和增大 200 μrad 。此时最大相位非线性误差为 2.918 nm。

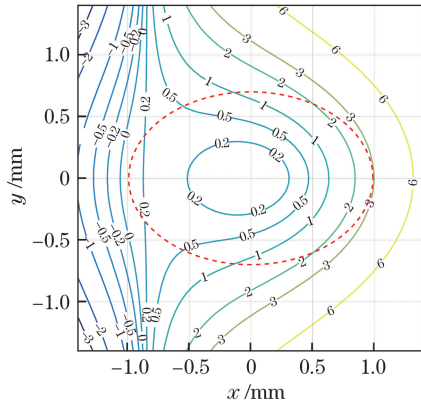


图 10 装调情况最差时的相位非线性误差分布 (曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 10 Nonlinear error distribution of phase with worst assembly errors (unit of error data in curves is nm)

干涉条纹相位非线性误差分析情况的汇总结果见表 2,可以看出,尽管装调过程中 d_R 和 d_L 均发生严重偏差,但当偏差量大小相同时,其干涉条纹相位非线性误差仅略大于理想位置的。而当 d_R 和 d_L 存在相对偏差时,即使偏差量仅为 1 mm,相位非线性误差还是会明显增大。但 1 mm 的宽容度相对目前已有的 SBIL 光学系统微米级的装调误差宽容度已有较大提升^[2]。同时,从图 8~10 可以看到,束腰半径和入射角度在正常范围内的变化对干涉条纹的相位非线性误差影响较小。因此,干涉条纹相位非线性误差主要取决于左右光路中束腰到基底距离的相对偏差。

4 小孔衍射的影响

以上分析是在不考虑小孔衍射的前提下进行的。实际上高斯光束经过小孔后会发生衍射,造成

表 2 干涉条纹相位非线性误差分析结果
Table 2 Nonlinear error analysis results of phase of interference fringe

Figure No.	Assembly error	Maximum nonlinear error /nm
Fig. 6	-	1.273
Fig. 7(a)	$d_R: -1 \text{ mm}$	2.183
Fig. 7(b)	$d_R: -20 \text{ mm}, d_L: -20 \text{ mm}$	1.398
Fig. 7(c)	$d_R: -21 \text{ mm}, d_L: -20 \text{ mm}$	2.397
Fig. 8	$\omega_{oR}: -1 \mu\text{m}, \omega_{oL}: +1 \mu\text{m}$	1.436
Fig. 9	$d_R: -21 \text{ mm}, d_L: -20 \text{ mm}$ $\omega_{oR}: -1 \mu\text{m}, \omega_{oL}: +1 \mu\text{m}$	2.585
Fig. 10	$\omega_{oR}: -1 \mu\text{m}, \omega_{oL}: +1 \mu\text{m}$ $\theta_R: -200 \mu\text{rad}, \theta_L: +200 \mu\text{rad}$ $d_R: -21 \text{ mm}, d_L: -20 \text{ mm}$	2.918

高斯光束特征参数的变化。如忽略小孔衍射,采用初始的高斯光束参数设计光路,可能对最终曝光结果产生不利影响。

如图 11 所示,复振幅为 $E(\boldsymbol{\rho}')$ 的高斯光束通过小孔后发生衍射,小孔平面上一点为 $Q'(\boldsymbol{\rho}')$, $x'O'y'$ 为小孔平面坐标系, α 为光束发散半角。根据 Rayleigh-Sommerfeld 衍射理论,距离小孔距离为 z 的观测面上点 $Q(\boldsymbol{\rho})$ 的复振幅^[14-15]为

$$E(\boldsymbol{\rho}; z) = \frac{1}{\lambda} \int E(\boldsymbol{\rho}'; 0) \left(\frac{1}{kl} - i \right) \frac{z}{l} \frac{\exp(ikl)}{l} d\boldsymbol{\rho}', \quad (14)$$

式中 $\boldsymbol{\rho}$ 为点 Q 的位置向量, $\boldsymbol{\rho}'$ 为点 Q' 的位置向量, l 为点 Q 和点 Q' 之间的距离。根据泰勒展开, l 可以写成

$$l = [|\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|^2 + z^2]^{1/2} = z + \frac{1}{2z} |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|^2 - \frac{1}{8z^3} |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|^4 + \dots, \quad (15)$$

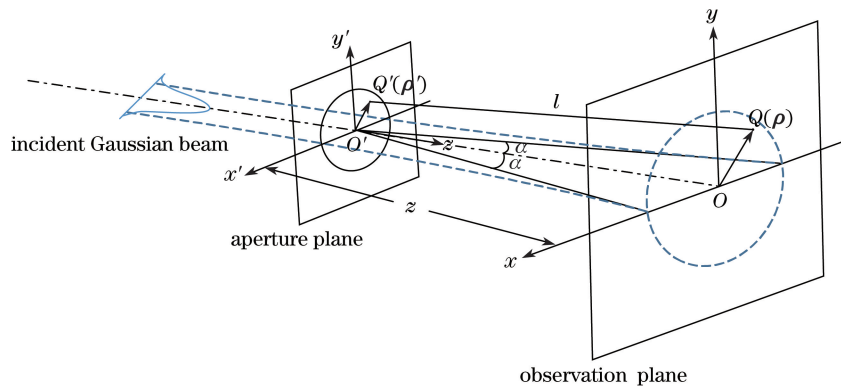


图 11 高斯光束经过圆孔衍射的示意图

Fig. 11 Schematic of Gaussian beam through circular aperture

对于 z 值较大的情况,有 $kl \gg 1, l \approx z$ 。因此,(15)式可以写为

$$l = z + \frac{1}{2z} |\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}'|^2. \quad (16)$$

从而,(14)式可写为

$$\mathbf{E}(\boldsymbol{\rho}; z) = \frac{-i}{\lambda z} \exp\left[ik\left(z + \frac{\rho^2}{2z}\right)\right] \int \mathbf{E}(\boldsymbol{\rho}'; 0) \times \exp\left(\frac{ik\rho'^2}{2z}\right) \exp\left(\frac{-k\boldsymbol{\rho}' \cdot \boldsymbol{\rho}}{z}\right) d\boldsymbol{\rho}', \quad (17)$$

式中 $\rho = |\boldsymbol{\rho}|, \rho' = |\boldsymbol{\rho}'|$ 。(17)式描述的衍射效应即为菲涅耳衍射。

高斯光经过小孔衍射后仍然具有高斯光属性^[16-17]。根据小孔衍射理论,可以通过近似高斯光束来近似模拟远场区中的衍射高斯光束。在菲涅耳衍射条件下,Belland 等^[17]推导了经过小孔衍射后近似高斯光束的特征参数表达形式:

$$\frac{\omega'_0}{\omega_0} = \frac{1 - \exp(-\gamma^2/2)}{\sqrt{1 - \exp(-\gamma^2)}}, \quad (18)$$

$$\frac{I'_0}{I_0} = \left[\frac{1 - \exp(-\gamma^2)}{1 - \exp(-\gamma^2/2)} \right]^2, \quad (19)$$

式中 ω'_0 为近似高斯光束的束腰半径; I_0 为高斯光束束腰位置的轴上光强; I'_0 为近似高斯光束束腰位置的轴上光强; $\gamma = a/\omega_0$ 。

图 12 所示为孔径与束腰半径比 a/ω_0 与 ω'_0/ω_0 、 I'_0/I_0 的关系曲线,分别对应于(18)~(19)式。可以看出,当 $a/\omega_0 > 3.0$ 时,高斯光特征参数基本没有变化,即此时高斯光基本不发生衍射。之前设定小孔半径 a 为 $\pi\omega_0/2$,对应的 ω'_0/ω_0 、 I'_0/I_0 值分别为 0.741、1.668。

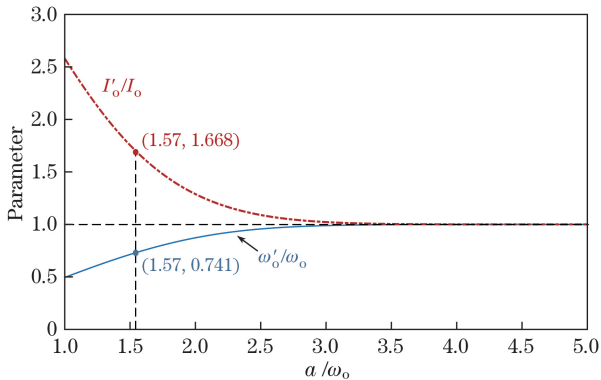


图 12 近似高斯光特征参数随小孔半径的变化曲线

Fig. 12 Curves of approximate characteristics of Gaussian beam versus aperture radius

将(13)式中高斯光参数设定为基值,即 $d_R = d_L = 435.8$ mm, $\theta_R = \theta_L = 45^\circ$,仅改变束腰半径 $\omega_{oR} = \omega_{oL} = \omega_0$,计算曝光光斑内的相位非线性误

差,获得图 13 所示的等高线图。可以看到,当高斯光束腰半径从 $\omega_0 = 50$ μm 减小到原来的 74.1%,即 $\omega_0 = 37.05$ μm 时,曝光光斑的半径由 0.7 mm 变为 0.94 mm。对比图 6 可以发现,相同坐标处的相位误差基本没有变化,但束腰变小导致光斑变大,曝光区域边缘处相位非线性误差变大,且最大相位误差从图 6 中的 1.273 nm 变为 3.101 nm。这与利用束腰曝光的 SBIL 光学系统的情况相似^[18]。

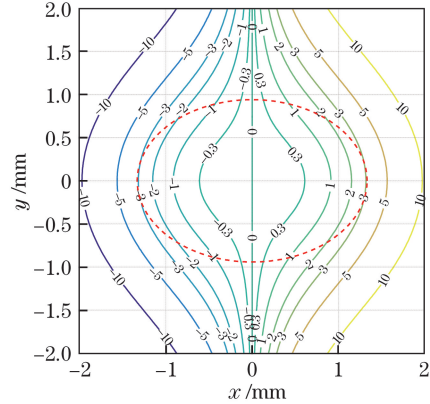


图 13 $\omega_0 = 37.05$ μm 时的相位非线性误差分布

(曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 13 Nonlinear error distribution of phase when $\omega_0 = 37.05$ μm (unit of error data in curves is nm)

针对上述问题,提出两种解决方案。一是增大小孔半径。从图 12 可以看到,随着孔径的增大,近似高斯光的特征值相对原值的变化逐渐减小,当孔径达到原束腰半径的 3 倍以上时,高斯光的特征值基本没有变化。但孔径越大,滤波效果越差,没有滤除的高频杂散光会影响最终曝光效果。

第二种方法是适当缩短光路。束腰半径变小后,相同坐标处的干涉条纹相位非线性误差基本没有变化,因此可以通过减小束腰到基底的距离,适当缩小曝光区域,从而使曝光区域内的非线性误差满足要求。将参数 d 由原来的 435.8 mm 缩短到 275 mm,当曝光光斑的半径为 0.60 mm 时,得到的相位非线性误差分布如图 14 所示,对应的干涉条纹最大相位非线性误差减小为 1.969 nm。从以上分析可以看出,缩短光路的方法对整体光学设计的影响最小,是解决相位非线性误差恶化问题的有效方法之一。

5 结 论

基于两束高斯光在远场干涉可获得纳米级直线度干涉条纹的原理,设计了一种新型的 SBIL 光学系统。分析了光路装调参数相对设计参数存在偏差

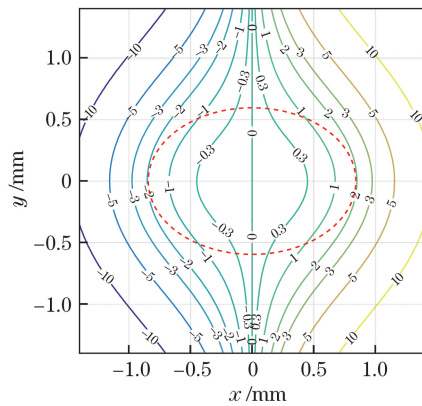


图 14 $d=275$ mm 时的相位非线性误差分布
(曲线中误差数据单位为 nm)

Fig. 14 Nonlinear error distribution of phase when
 $d=275$ mm (unit of error data in curves is nm)

时,干涉条纹相位非线性误差的分布情况。结果表明,所设计的光学系统可以获得纳米级直线度的干涉条纹,在存在一定装调误差的情况下,该系统具有很强的稳健性,大大降低了装调难度。基于菲涅耳衍射理论,采用近似高斯光特征参数分析法,通过对高斯光穿过小孔后衍射情况的研究,提出了缩短光路的设计方案,有效解决了近似高斯光束腰变小导致曝光光斑边缘条纹非线性误差恶化的问题。

参 考 文 献

- [1] Schattenburg M L, Chen C, Everett P N, *et al.* Sub-100 nm metrology using interferometrically produced fiducials[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1999, 17(6): 2692-2697.
- [2] Konkola P T. Design and analysis of a scanning beam interference lithography system for patterning gratings with nanometer-level distortions[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003: 31-32.
- [3] Pati G S, Heilmann R K, Konkola P T, *et al.* Generalized scanning beam interference lithography system for patterning gratings with variable period progressions[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2002, 20(6): 2617-2621.
- [4] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Nanometer-accurate grating fabrication with scanning beam interference lithography[C]. *SPIE*, 2002, 4936: 126-134.
- [5] Wang L J. Research on the phase-shifting locking technology for scanning interference lithography with nanometer accuracy[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016: 11-12.
王磊杰. 扫描干涉光刻纳米精度移相锁定技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2016: 11-12.
- [6] Chen C G, Konkola P T, Heilmann R K, *et al.* Image metrology and system controls for scanning beam interference lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2001, 19(6): 2335-2341.
- [7] Chen C G. Beam alignment and image metrology for scanning beam interference lithography: fabricating gratings with nanometer phase accuracy[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003: 58-61.
- [8] Jiang S. Study on measurement and adjustment of interference fringe for scanning beam interference lithography system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 21-23.
姜珊. 扫描干涉场曝光系统干涉条纹测量与调整方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 21-23.
- [9] Han J, Bayanheshig, Li W H. The ratio choice method of the pinhole aperture to the waist of the Gaussian laser in the fabrication of holographic gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 084202.
韩建, 巴音贺希格, 李文昊. 全息光栅曝光系统中空间滤波器孔径与激光束腰关系的选择方法[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 084202.
- [10] Siegman A E. *Lasers*[M]. Mill Valley: University Science Books, 1986: 663.
- [11] Ferrera J, Schattenburg M L, Smith H I. Analysis of distortion in interferometric lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 1996, 14(6): 4009-4013.
- [12] Ferrera J. Nanometer-scale placement in electron-beam lithography[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2000: 49-55.
- [13] Lu S, Yang K M, Zhu Y, *et al.* Interference fringe phase locking system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 1-7.
鲁森, 杨开明, 朱煜, 等. 干涉条纹相位锁定系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 1-7.
- [14] Mahajan V N. Axial irradiance and optimum focusing of laser beams[J]. *Applied optics*, 1983, 22(19): 3042-3053.
- [15] Mahajan V N. Optical imaging and aberrations, part II: Wave diffraction optics[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011: 5-10.

- [16] Dickson L D. Characteristics of a propagating Gaussian beam[J]. Applied Optics, 1970, 9(8): 1854-1861.
- [17] Belland P, Crenn J P. Changes in the characteristics of a Gaussian beam weakly diffracted by a circular aperture[J]. Applied Optics, 1982, 21(3): 522-527.
- [18] Wang W, Jiang S, Song Y, *et al.* Design of spot size and optical path in scanning beam interference lithography system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0905002.
王玮, 姜珊, 宋莹, 等. 扫描干涉场曝光系统光斑尺寸与光路设计[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0905002.